

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Modernizace základních pohonů válcovací tratě Kvarto
a jejich ovládání**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Klára BEJČKOVÁ**
Osobní číslo: **E11N0065P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Modernizace základních pohonů válcovací tratě Kvarto a jejich ovládání**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte základní vlastnosti a principy řízení elektrických pohonů používaných na válcovacích tratích.
2. Popište možnosti modernizace stejnosměrných pohonů válcovací tratě Kvarto napájených z dynam, diskutujte výhody a nevýhody různých řešení.
3. Navrhněte silové a ovládací obvody pro pohony válcovací tratě Kvarto na konkrétním případě.
4. Zhodnoťte navrženou modernizaci zařízení a její přínos (případně navrhněte možnosti dalšího rozšíření a vylepšení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Zeman, K.: Automatická regulace pohonů, Skripta ZČU Plzeň 1994.
2. Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, část 3. Skripta ZČU Plzeň 2003.
3. Elektronické informační zdroje, katalogy.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Glasberger, Ph.D.
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Konzultant diplomové práce: Ing. Vladimír Rajnoch

Ostatní konzultanti: Ing. Jan Jakubec

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


Doc. Ing. Jiří Hamberger, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá modernizací pohonu válcovací tratě a jeho řízením. Teoretická část se věnuje druhům elektrických pohonů používaných ve válcovnách a způsobům modernizace válcovacích tratí se stejnosměrnými pohony. V další části je na konkrétním případě navržena modernizace pohonu válcovací stolice a tahového navíjedla a způsob řízení a ovládání tyristorových měničů. V poslední části je proveden návrh regulátorů válcovací tratě a simulace jejich statických a dynamických vlastností v prostředí Simulink.

Klíčová slova

Válcovací trať, válcovací stolice, navíjedlo, Ward-Leonardovo soustrojí, regulace, Simulink

Abstract

The master thesis presents modernization of a drive of a milling stand and its control. The theoretical part deals with different types of drives usually used for rolling mills and various ways of modernization of rolling mills with DC drives. In the next part a concrete modernization of a rolling mill and winder drive is performed, including the control of thyristor converters. The last part deals with the design of the milling stand regulation and simulation of its static and dynamic properties in Simulink.

Key words

Milling stand, rolling mill, winder, Ward-Leonard drive, regulation, Simulink

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 1. 5. 2013

Klára Bejčková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svým konzultantům panu Ing. Vladimíru Rajnochovi a panu Ing. Janu Jakubcovi z firmy Těžké strojírenství Plzeň za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a poskytnuté podnikové materiály.

Současně děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Glasbergerovi, Ph.D. za účinnou metodickou a odbornou pomoc při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	14
1 POHONY VÁLCOVACÍCH TRATÍ	15
1.1 WARD-LEONARDOVO SOUSTROJÍ	15
1.2 ILGNEROVO SOUSTROJÍ	16
1.3 PODSYNCHRONNÍ POLOVODIČOVÁ KASKÁDA	17
1.4 STATICKÉ MĚNIČE	18
1.4.1 Stejnoseměrné pohony	18
1.4.2 Střídavé pohony	18
2 MODERNIZACE VÁLCOVACÍCH TRATÍ SE STEJNOSMĚRNÝMI MOTORY	19
2.1 DŮVODY MODERNIZACE	19
2.2 ČÁSTEČNÁ MODERNIZACE POHONU	20
2.3 KOMPLETNÍ MODERNIZACE POHONU	24
3 MODERNIZACE ZÁKLADNÍCH POHONŮ VÁLCOVACÍ TRATĚ KVARTO	25
3.1 VÁLCOVACÍ TRATĚ S TAHOVÝMI NAVÍJEDLY	25
3.1.1 Popis válcovací tratě	25
3.1.2 Popis původních pohonů válcovací tratě	25
3.1.3 Požadavky na elektrický pohon	26
3.1.4 Popis tahového navíjeda	27
3.1.5 Technická data válcovací tratě	28
3.2 KONCEPCE MODERNIZACE	31
3.3 MODERNIZACE POHONU VÁLCOVACÍ STOLICE	32
3.3.1 Měnič pro napájení motoru	32
3.3.2 Síťové pojistky	34
3.3.3 Měničový transformátor, komutační tlumivky	34
3.3.4 Vyhlažovací tlumivky	36
3.3.5 Popis činnosti měniče	37
3.3.6 Řízení a ovládání měniče	38
3.4 MODERNIZACE POHONU TAHOVÉHO NAVÍJEDA	43
3.4.1 Výpočet potřebných momentů a otáček navíjeda	43
3.4.2 Měnič pro pohon navíjeda	47
3.4.3 Síťové pojistky	48
3.4.4 Měničový transformátor, komutační tlumivky	48

3.4.5	Vyhlazovací tlumivky	49
3.4.6	Řízení a ovládání měniče.....	50
3.5	REGULAČNÍ SOUSTAVA POHONU VÁLCOVACÍ STOLICE	53
3.5.1	Regulační obvod kotevního proudu	55
3.5.2	Regulační obvod rychlosti	58
3.5.3	Regulace obvodu buzení	61
3.5.4	Regulace indukovaného napětí.....	63
3.5.5	Simulace celého pohonu včetně závislého odbuzování.....	64
3.6	REGULAČNÍ SOUSTAVA POHONU NAVÍJEDLA.....	65
3.6.1	Simulace navíjeda s regulací tahu.....	65
3.6.2	Regulační obvod kotevního proudu	67
3.6.3	Regulační obvod rychlosti	68
3.6.4	Regulace obvodu buzení	71
3.6.5	Regulace indukovaného napětí.....	72
3.6.6	Simulace pohonu s regulací tahu	73
ZÁVĚR		74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		75
PŘÍLOHY		76
SEZNAM PŘÍLOH		76

Seznam symbolů a zkratek

A	[dB]	zesílení (používané v logaritmických frekvenčních charakteristikách)
$a_{nav.}$	[m/s ²]	zrychlení navíjedla
$a_{stol.}$	[m/s ²]	zrychlení válcovací stolice
B	[m]	šířka pásu
D	[m]	průměr svitku
E	[V]	indukované napětí
F_b	[-]	přenos budícího vinutí
F_{cb}	[-]	přenos čidla budícího proudu
F_{ci}	[-]	přenos čidla kotevního proudu
$F_{c\omega}$	[-]	přenos čidla rychlosti
F_{Fi}	[-]	přenos filtru regulátoru proudu
F_{io}	[-]	přenos otevřené smyčky kotevního proudu
F_{iu}	[-]	přenos uzavřené smyčky kotevního proudu
F_k	[-]	přenos kotvy motoru
F_M	[-]	přenos setrvačnosti motoru
F_{Rb}	[-]	přenos regulátoru budícího proudu
F_{Re}	[-]	přenos regulátoru indukovaného napětí
F_{Ri}	[-]	přenos regulátoru kotevního proudu
$F_{R\omega}$	[-]	přenos regulátoru rychlosti
F_T	[N]	tahová síla
F_U	[-]	přenos usměrňovače
F_{Ub}	[-]	přenos usměrňovače budícího obvodu
F_V	[-]	přenos tlumení vířivými proudy motoru
$F_{\omega o}$	[-]	přenos otevřené smyčky rychlosti
$F_{\omega u}$	[-]	přenos uzavřené smyčky rychlosti
G	[kg]	hmotnost

H	[mm]	tloušťka pásu
i	[-]	převod
I_{AC}	[A]	vstupní 3f efektivní proud měniče
I_b	[A]	budící proud
I_d	[A]	stejnsměrný proud měniče
I_k	[A]	kotevní proud
I_{Lmax}	[A]	špičkový proud tlumivky
I_N	[A]	jmenovitý proud
I_{thmax}	[A]	trvalý povolený proud tlumivkou
I_σ	[A]	efektivní hodnota střídavé složky usměrněného proudu
$J_{mot.}$	[kgm ²]	moment setrvačnosti motoru
$J_{nav.}$	[kgm ²]	moment setrvačnosti navíječky
$J_{stol.}$	[kgm ²]	moment setrvačnosti stolice
K_b	[-]	konstanta budícího vinutí
$K_{\check{c}b}$	[-]	zesílení čidla budícího proudu
$K_{\check{c}i}$	[-]	zesílení čidla kotevního proudu
$K_{\check{c}\omega}$	[-]	zesílení čidla rychlosti
K_{Rb}	[-]	zesílení regulátoru budícího proudu
K_{Re}	[-]	zesílení regulátoru indukovaného napětí
K_{Ri}	[-]	zesílení regulátoru kotevního proudu
$K_{R\omega}$	[-]	zesílení regulátoru rychlosti
K_T	[-]	poměrný typový výkon transformátoru
K_U	[-]	zesílení usměrňovače
K_{Ub}	[-]	zesílení usměrňovače budícího obvodu
K_V	[-]	zesílení tlumení vířivými proudy motoru
$k\Phi_0$	[-]	konstanta nabuzení při odbuzení
$k\Phi_N$	[-]	konstanta nabuzení při jmenovité rychlosti

$k\Phi$	[-]	konstanta buzení
L_b	[H]	indukčnost buzení
L_c	[H]	celková indukčnost obvodu za měničem
L_k	[H]	indukčnost kotvy
L_v	[H]	indukčnost vyhlazovací tlumivky
M	[Nm]	točivý moment
M_D	[Nm]	dynamický moment
M_T	[Nm]	tahový moment
M_Z	[Nm]	zátěžný moment
$M_{ztrát.}$	[Nm]	ztrátový moment
n	[ot/min]	otáčivá rychlost
N_z	[-]	počet závitů
p	[-]	pulsnost
P	[W]	výkon
P_{dN}	[W]	jmenovitý výkon odebíraný stejnosměrnou zátěží
R	[m]	poloměr
R_b	[Ω]	odpor buzení
R_k	[Ω]	odpor kotvy
S_K	[VA]	zkratový výkon sítě
S_P	[VA]	zdánlivý výkon primárního vinutí transformátoru
S_S	[VA]	zdánlivý výkon sekundárního vinutí transformátoru
S_T	[VA]	zkratový výkon transformátoru
t	[s]	čas
U	[V]	napětí
U_b	[V]	budící napětí
U_{di}	[V]	střední hodnota napětí zátěže
$\Delta u_{k\%}$	[%]	úbytek napětí na komutační tlumivce

U_m	[V]	maximální hodnota sdruženého napětí na svorkách měniče
U_{mot}	[V]	jmenovité napětí motoru
U_s	[V]	efektivní hodnota sdruženého napětí na svorkách měniče
U_σ	[V]	efektivní hodnota střídavé složky usměrněného napětí
$v_{nav.}$	[m/s]	rychlost navíjení
$v_{stol.}$	[m/s]	rychlost válcování
α	[°]	úhel řízení usměrňovače
α_b	[°]	úhel řízení usměrňovače obvodu buzení
ε	[rad/s ²]	úhlové zrychlení
η	[-]	účinnost
σ_{el}	[%]	efektivní hodnota proudového zvlnění
τ_b	[s]	časová konstanta budícího vinutí
$\tau_{\dot{\omega}}$	[s]	časová konstanta čidla rychlosti
τ_k	[s]	časová konstanta kotvy motoru
τ_{Rb}	[s]	časová konstanta regulátoru budícího proudu
τ_{Re}	[s]	časová konstanta regulátoru indukovaného napětí
τ_{Ri}	[s]	časová konstanta regulátoru kotevního proudu
$\tau_{R\omega}$	[s]	časová konstanta regulátoru rychlosti
τ_U	[s]	časová konstanta usměrňovače
τ_v	[s]	časová konstanta budícího vinutí respektující vliv vířivých proudů
τ	[s]	časová konstanta
φ_b	[s]	bezpečnost ve fázi
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
ω_N	[rad/s]	jmenovitá úhlová rychlost motoru
ω_r	[rad/s]	úhlový kmitočet řezu (používaný při vyšetřování stability regulačního obvodu metodou logaritmických frekvenčních charakteristik)
$\omega_{\sigma(1)}$	[rad/s]	úhlový kmitočet 1. harmonické střídavé složky usměrněného napětí

Úvod

Technologie válcovacího procesu vyžaduje rychlou dynamiku a přesnou regulaci v okolí nulových otáček. Pro pohony velkých reverzačních válcovacích stolic a pro zajištění širokého rozsahu otáček bylo v minulém století nutné použití Ward-Leonardova nebo Ilgnerova soustrojí. S rozvojem polovodičové techniky a tyristorových měničů dochází v dnešní době k modernizaci pohonů válcovacích tratí. Ward-Leonardovo soustrojí nebo jeho část se nahrazuje polovodičovými měniči. Vysoký záběrný moment, velký rozsah otáček a jednoduché řízení stejnosměrných motorů zajišťuje jejich stále použití v těchto průmyslových aplikacích, zejména u pohonů velkých výkonů.

Cílem této diplomové práce je navrhnout modernizaci pohonu válcovací tratě Kvarto s tahovými navíjedly určené pro výrobu měděných a mosazných ploštín a pásů. Modernizace pohonu stolice a navíjedla spočívá v zachování hlavních stejnosměrných motorů a náhradě zbytku Ward-Leonardova soustrojí tyristorovými měniči.

Teoretická část je věnována historickému vývoji pohonů válcovacích tratí. Jsou zde rozebrány jak nejstarší pohony, využívající kaskádního řazení motorů, tak i pohony využívající nejnovější polovodičové techniky.

V druhé části jsou rozebrány způsoby modernizace válcovacích tratí napájených z Ward-Leonardových soustrojí. Je možné nahradit celé soustrojí úplně novým pohonem nebo zachovat hlavní stejnosměrné motory, případně i jejich napájení z dynam. Rozsah modernizace je většinou limitován ekonomickými požadavky zákazníka.

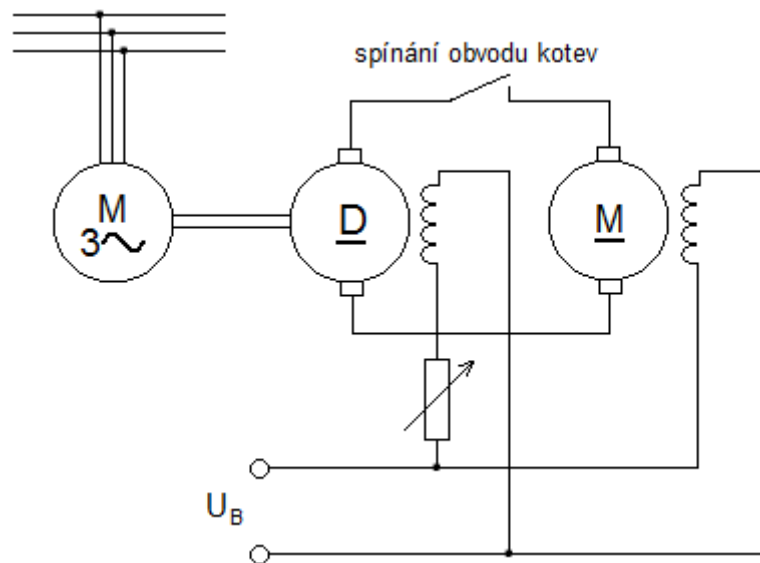
V další části je modernizace pohonu válcovací stolice navržena pro konkrétní případ. Dimenzování měničů je provedeno pro úplnou modernizaci pohonu stolice. Dále je navržen způsob řízení a ovládání měniče. Je zde popsáno fyzické rozmístění digitálních a analogových vstupů a výstupů frekvenčního měniče a jejich osazení ovládacími tlačítky a signalizačními prvky.

V poslední části je proveden návrh regulátorů válcovací tratě. U pohonu válcovací stolice se jedná o regulaci kotevního proudu, úhlové rychlosti (otáček) a buzení poháněcího motoru. Řízení měniče napájecího motor tahového navíjedla je realizováno regulací tahu. Statické i dynamické vlastnosti regulačních smyček jsou nasimulovány v prostředí Simulink.

1 Pohony válcovacích tratí

1.1 Ward-Leonardovo soustrojí

Ward-Leonardovo soustrojí bylo nejčastěji používaným pohonem ve válcovnách před nástupem polovodičové techniky. Kotva stejnosměrného motoru pohánějícího válcovací stolici je elektricky propojena s kotvou pomocného dynama (generátoru). Dynamo je společnou hřídelí mechanicky spojeno se střídavým - většinou asynchronním - motorem, který se otáčí konstantními otáčkami.



Obr. 1-1 – Ward-Leonardovo soustrojí [1]

Spínání obvodu kotev je nezbytné pro vypnutí a zapnutí pohonu. Během rozběhu střídavého motoru je buzení statoru dynama nastaveno na minimum, buzení statoru stejnosměrného motoru je připojeno, obvodem kotvy dynama a stejnosměrného motoru neprotéká proud. Po dosažení provozních otáček střídavého motoru se zvyšováním budícího proudu dynama začne na jeho kotvě indukovat napětí a stejnosměrný motor se rozběhne. Otáčky motoru lze plynule měnit změnou buzení dynama. Regulace buzení bývá obvykle odporová. Zvyšováním buzení dynama při konstantním buzení stejnosměrného motoru se zvyšuje výkon a otáčky, moment zůstává konstantní. Při plném nabuzení dynama lze zvýšit otáčky stejnosměrného motoru jeho částečným odbuzením, přičemž zůstává konstantní výkon, ale klesá moment. [1]

Původní W-L soustrojí sestává z jednoho nebo více rotačních stejnosměrných generátorů, jejichž kotevní napětí je řízeno jejich budícím polem pomocí rotačního budiče. Generátor i budič jsou poháněny konstantní rychlostí asynchronním nebo synchronním motorem. Kotva generátoru je spojena s kotvou cize buzeného stejnosměrného

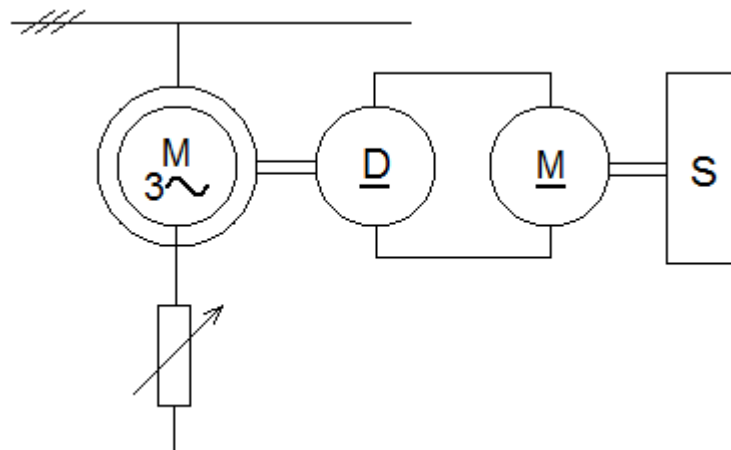
motoru. Regulace v uzavřené smyčce je zajištěna magnetickými zesilovači, řídicími proud budičů.

Výhodou tohoto uspořádání je akumulace kinetické energie v rotujících hmotách asynchronního motoru a stejnosměrného generátoru, které dynamicky oddělují střídavý zdroj od zátěže. Toto oddělení je výhodné při reverzaci hlavního pohonu nebo při použití citlivých zátěží, aby se zamezilo rušivým vlivům ze sítě. Nevýhodou tohoto systému je poměrně pomalá odezva na přechodové děje, zejména rozběh, brzdění a náhlá změna otáček, způsobená velkou indukčností generátoru. Dynamiku tohoto soustrojí je možné zlepšit přibuzením generátoru, a případně i motoru, během rychlostních přechodových jevů.

Moderní způsob řízení W-L soustrojí je dosažen nahrazením rotačních budičů statickými měniči, napájejícími přímo pole generátoru a motoru. Regulace v uzavřené smyčce je realizována digitálním mikroprocesorovým řídicím systémem. Dynamická odezva tohoto systému je v podstatě zlepšena eliminováním budiče pole dynamu a dále použitím regulátoru kotevního proudu. [2]

1.2 Ilgnerovo soustrojí

Ilgnerovo soustrojí je doplněním Ward-Leonardova soustrojí o setrvačnick. Vyžívalo se pro pohony blokových stolic válcoven s velkým krátkodobým rázovým zatížením a následným odlehčením. Setrvačnick výrazně tlumil výkonové rázy a tím omezoval jejich nepříznivé působení na motor a napájecí síť. [3]



Obr. 1-2 – Ilgnerovo soustrojí [3]

Během chodu naprázdno odebírá setrvačnick energii od motoru a zrychluje. Při velkém výkonovém rázu otáčky soustrojí zpomalí a setrvačné hmoty Ilgnerova soustrojí přispějí svou kinetickou energií ke zmírnění této špičky. Při vpichu ingotu do válců stolice vznikne

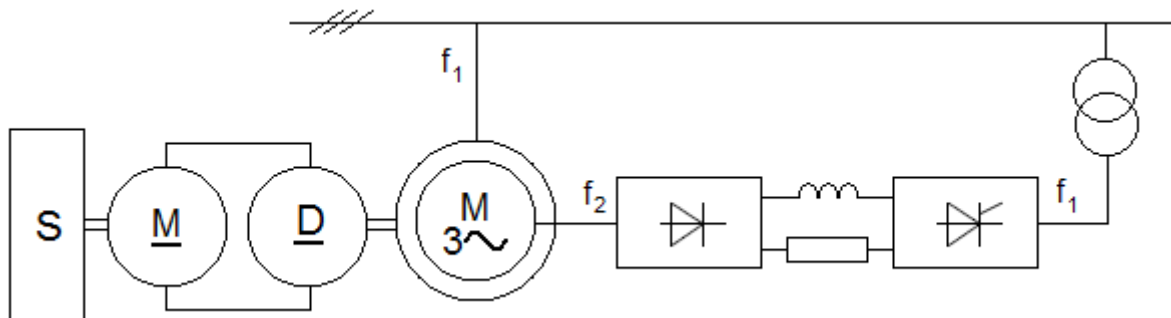
momentový ráz, který působí jako brzdňý moment na soustavu válcovací stolice. Energie je nejprve hrazena ze setrvačných hmot soustrojí a teprve později se odebírá ze sítě. [3]

U reverzační stolice je potřeba akcelerační moment pro zrychlení motoru a stolice. Materiál může vstupovat nízkou rychlostí, potom být urychlen při průchodu stolicí a na konci zpomalen. U takovéto stolice není vhodné vkládat mezi motor a stolicí setrvačnick. U nereverzačních stolic a tam, kde průchod trvá nejvýše několik sekund, je vhodné mezi motor a stolicí zařadit setrvačnick, který omezí výkonové rázy zátěže. [2]

Pro využití vlivu setrvačnicku je nutný pokles otáček motoru při výkonovém rázu. Jeho použití proto není vhodné s motory, které mají konstantní rychlostní charakteristiku jako synchronní motory, ani s motory vykazujícími malý pokles otáček v závislosti na zatížení, jako například stejnosměrné motory s paralelním buzením nebo asynchronní motory s kotvou nakrátko. Za pohon soustrojí je tedy vhodné použít buď kompaundní stejnosměrný motor, nebo asynchronní motor s vinutou kotvou. Přidáním odporu do rotorového obvodu se dosáhne měkčí charakteristiky motoru. [2]

1.3 Podsynchronní polovodičová kaskáda

Podsynchronní polovodičová kaskáda (pro řízení Ilgnerova soustrojí) využívá skluzové energie kroužkového asynchronního motoru pro zvýšení energetické účinnosti přeměny střídavého proudu na stejnosměrný. [3]



Obr. 1-3 - Podsynchronní polovodičová kaskáda pro Ilgnerovo soustrojí

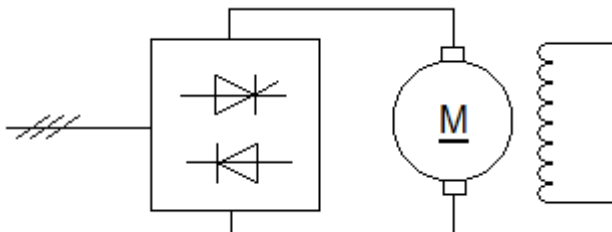
V obvodu kotvy asynchronního motoru je místo odporu zařazen měnič kmitočtu se stejnosměrným obvodem. Rotorové vinutí je přes kroužky připojeno na neřízený usměrňovač. Ve stejnosměrném meziobvodu je zařazena tlumivka, která vyhladí průběh proudu, a její činný odpor. Rychlost motoru se řídí změnou řídicího úhlu.

Výhodou této kaskády je možnost rekuperace skluzové energie zpět do sítě, místo jejího maření v odporníku.

1.4 Statické měniče

1.4.1 Stejnoseměrné pohony

Rozvoj polovodičové techniky umožnil použití tyristorových měničů s vnější komutací pro řízení stejnosměrných pohonů. Náhradou Ilgnerova soustrojí statickými měniči se dosáhne vyšších dynamických vlastností a úspor energie. V jejich neprospěch ale hraje negativní ovlivňování napájecí sítě i napájených stejnosměrných motorů.



Obr. 1-4 - Tyristorový měnič použitý pro řízení stejnosměrného motoru

Výhodou použití statických měničů oproti rotačním měničům je jejich vyšší účinnost, nižší provozní náklady, menší hlučnost, menší zastavěný prostor, snadná instalace a možnost synchronizace dvou vzdálených měničů.

1.4.2 Střídavé pohony

Odstranění problému obtížné údržby stejnosměrných motorů přinesly třífázové tyristorové měniče pro střídavé pohony. První asynchronní motory byly napájeny z cyklokonvertorů. Výhodou tohoto řešení byla snadná údržba, lepší dynamická odezva díky nízkému momentu setrvačnosti a v podstatě neomezený výstupní výkon.

Další vývoj polovodičových součástek vedl ke GTO tyristorům a později IGBT tranzistorům. Měniče kmitočtu s napěťovými střídači s IGBT součástkami jsou dnes nejpoužívanějšími pro nízkonapěťové aplikace. Pro vysokonapěťové aplikace jsou nejčastěji používány tyristory IGCT.

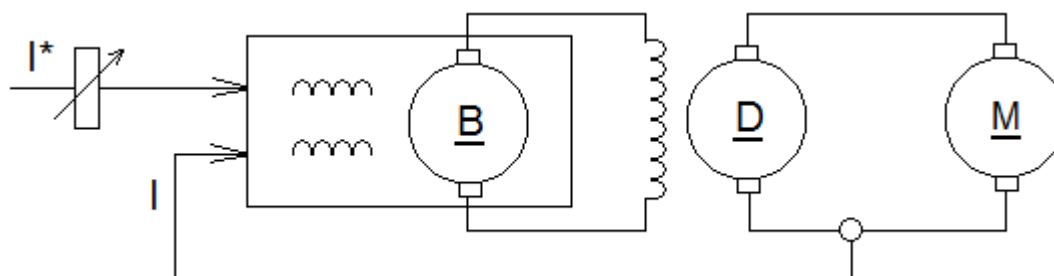
Kromě asynchronních motorů pro nízkonapěťové aplikace, se pro pohony válcovacích stolic používají rovněž synchronní motory. Jejich výhodou je vysoká účinnost, široký rozsah odbuzování a vysoká přesnost řízení momentu. Pro válcovenské aplikace se nejčastěji používají synchronní motory s vyniklými póly nebo s permanentními magnety. [4]

2 Modernizace válcovacích tratí se stejnosměrnými motory

2.1 Důvody modernizace

V první polovině minulého století ještě nebyly k dispozici řízené usměrňovače pro napájení kotevnic a budících obvodů stejnosměrných regulovaných motorů ani elektronické řídicí a regulační prostředky. Silové napájecí soustavy byly sestaveny z Ward-Leonardova soustrojí, z jehož dynama byla napájena kotva poháněcího stejnosměrného motoru. Dynamo W-L soustrojí bylo poháněno asynchronním nebo synchronním motorem.

Budící vinutí dynama a motoru byla napájena z rotačních budičů, které byly řízeny soustavou rotačních zesilovačů (rychlobudičů) a ovládány kontaktními kontroléry nebo magnetickými zesilovači, viz Obr. 2-1. Tento systém se vyznačoval dlouhými časovými konstantami budících vinutí a celkovou nestabilitou. Otáčky a moment motoru se řídily nastavením určité hodnoty budících proudů dynama a motoru. Nebylo možné dosáhnout zpětnovazební regulace otáček v závislosti na změně momentového zatížení motoru, teploty nebo kolísání sítě. Tyto základní nedostatky spolu s dosluhující životností řídicích obvodů vedou v dnešní době často k potřebám modernizace pohonů válcovacích tratí.



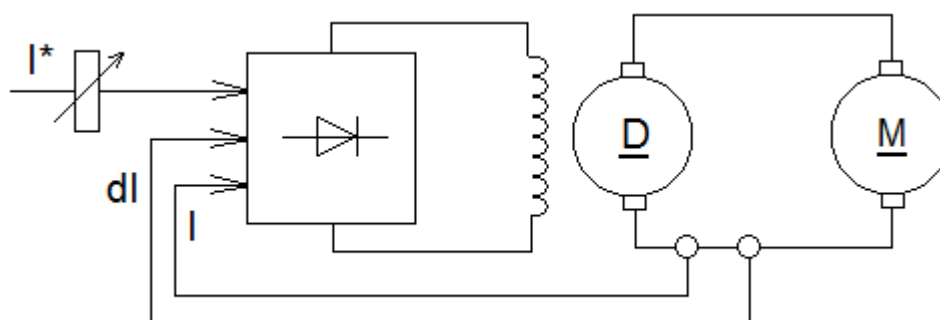
Obr. 2-1- Pohon s rotačními budiči

Dalšími důvody modernizace bývá potřeba zvýšení výkonu, momentu, rychlosti nebo jiného parametru elektrického zařízení. Modernizací získáme úspory energie, lepší dynamické vlastnosti, vyšší spolehlivost, menší nároky na prostor a snadnější údržbu.

V některých případech se modernizace provádí náhradou střídavého motoru i stejnosměrného dynama tyristorovým měničem, ze kterého je napájena kotva motoru. Pokud soustrojí dynama a motoru vykazuje dostatečný výkon a je v dobrém stavu, bývá často požadována levnější varianta, spočívající pouze v modernizaci řízení. Reguluje se především budící pole dynama, kotevní proud a rychlost motoru. Zároveň je možné řídit budící pole motoru.

2.2 Částečná modernizace pohonu

Méně finančně náročným řešením je tzv. „malá tyristorizace“. Jedná se o zachování silového napájení motoru z W-L soustrojí a nasazení malých tyristorových měničů do obvodů buzení dynam a motorů. Modernizace v tomto případě spočívá v náhradě rotačních budičů určených pro napájení budícího vinutí dynama W-L soustrojí a rotačních budičů pro napájení buzení poháněcího motoru statickými tyristorovými usměrňovači s číslicovým mikroprocesorovým řízením a náhradě řídicích kontrolérů číslicovým mikroprocesorovým řídicím systémem pohonů, technologickým regulátorem, viz Obr. 2-2.



Obr. 2-2 - Pohon s měničem pro řízení dynama

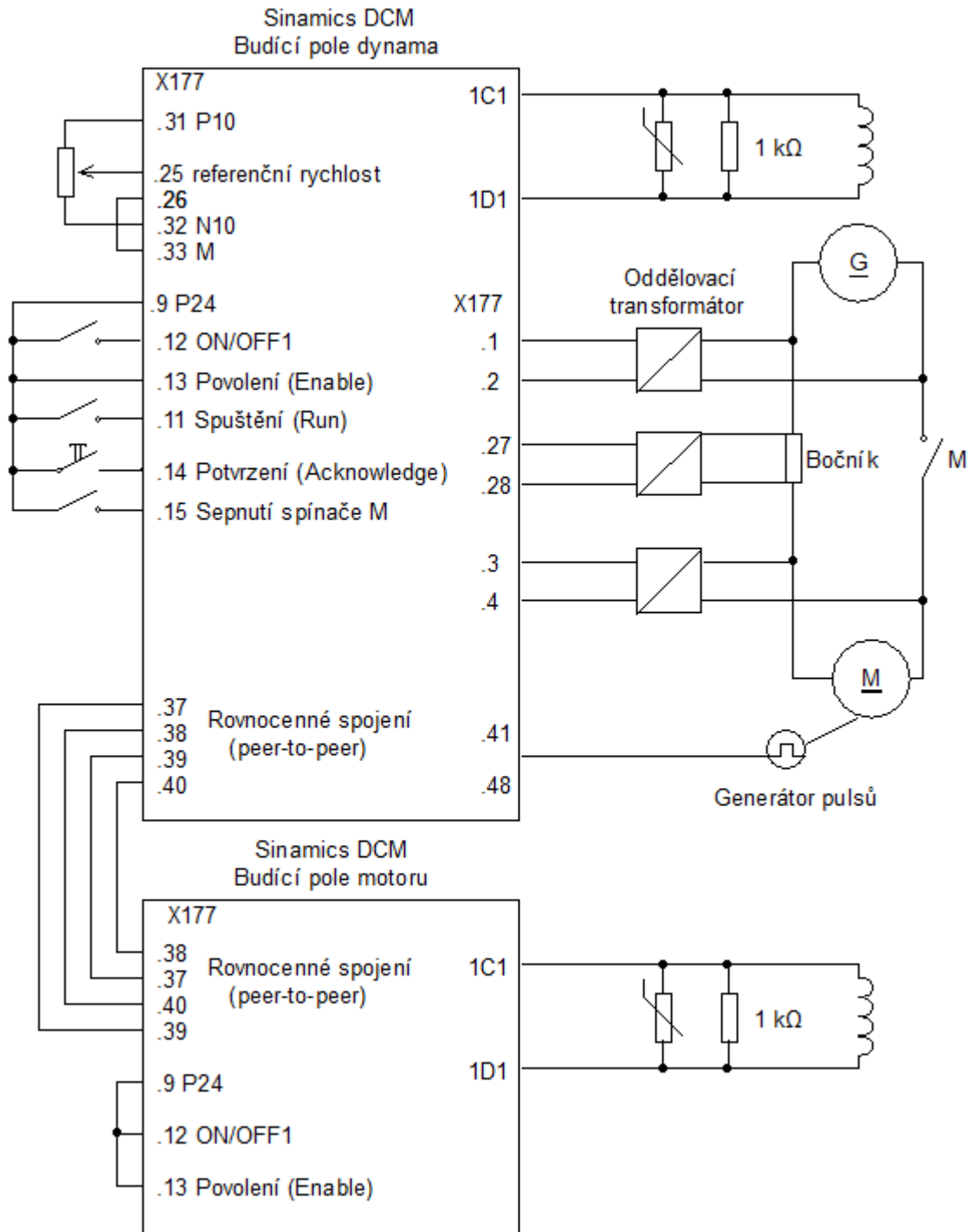
Použitím tyristorových měničů se zajistí nezávislost skutečných hodnot budících proudů na kolísání napětí v síti, kolísání otáček poháněcích agregátů zdrojů konstantního napětí a změnách oteplení budících vinutí. Ve spojení s nadřazeným regulátorem umožní realizaci zpětnovazebních regulací otáček a kotevních proudů poháněcích motorů. Zpětnovazební regulací otáček je automaticky kompenzován vliv remanence dynama a tím zajištěn klid pohonu při zadání požadavku na nulové otáčky motoru a jsou minimalizovány změny otáček motoru při změnách jeho zatížení. Při vybavení motoru čidlem otáček je umožněna realizace jeho závislého odbuzování.

Modernizací pohonů je zajištěna účinná regulace rychlosti válcovací stolice a tahů navíjedel. Tím jsou vytvořeny nezbytně nutné předpoklady pro účinnou regulaci tloušťky válcovaného materiálu. Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o modernizaci stávajících pohonů tratě, při zachování původních poháněcích stejnosměrných motorů a jejich napájení z dynam Ward-Leonardových soustrojí. Pro úspěšnou modernizaci pohonu s W-L soustrojím je nutné optimální dimenzování tyristorových měničů pro napájení budících vinutí dynama a poháněcího motoru a volba vhodné regulační struktury.

Pro napájení buzení dynama by se měl použít 4Q měnič, aby bylo možné dosáhnout obou polarit napětí generátoru. Motor potom bude možné provozovat v obou směrech točení.

Proud měniče by měl být navržen pro maximální proud budicího pole dynamu. Jedná se o plně řízený třífázový tyristorový můstkový usměrňovač s vlastním chlazením.

Pro napájení buzení motoru stačí použít 2Q měnič, protože směr otáčení motoru je určován polaritou napětí kotvy. Dále je uvedeno doporučené schéma zapojení tyristorových měničů Siemens pro tento způsob modernizace a popis jednotlivých prvků dle výrobce.



Obr. 2-3 – Typické zapojení soustrojí dynamu a motoru při napájení z tyristorového měniče [5]

Oddělovací transformátor

Izolační transformátory jsou potřebné pro přivedení signálu kotevního proudu a napětí kotvy motoru a dynamu do měniče. Oddělovací transformátor pro kotevní proud je používán společně s bočníkem v kotevním obvodu. Rozsah by měl být ± 8 VDC pro maximální proud motoru. Oddělovací transformátor pro napětí motoru a dynamu se navrhuje pro maximální napětí kotvy bloku. Rozsah by měl být ± 8 VDC pro jmenovité napětí motoru a dynamu. V obou případech by se měla ponechat rezerva pro transienční přetížení. [5]

Ochranný obvod paralelně k budícímu vinutí (přepět'ová ochrana)

Na výstupu měniče napájejícího buzení musí být ochranný obvod omezující přepětí. Tento obvod působí zejména v případě výpadku napájení ze strany sítě a tím chrání zařízení před poškozením vlivem napět'ové špičky. Dimenzuje se podle energie pole ($LI^2/2$).

Paralelní odpor k budícímu vinutí

Pokud proud poklesne pod přídržný proud, tyristory se zablokují. Aby se zabránilo vypnutí přepět'ové ochrany, je doporučováno zařadit rezistor ≤ 1 k Ω paralelně k buzení. Výkon tohoto rezistoru se počítá ze jmenovitého napětí pole dynamu nebo motoru. ($P_v=U^2/R$).

Regulace a ovládání měniče

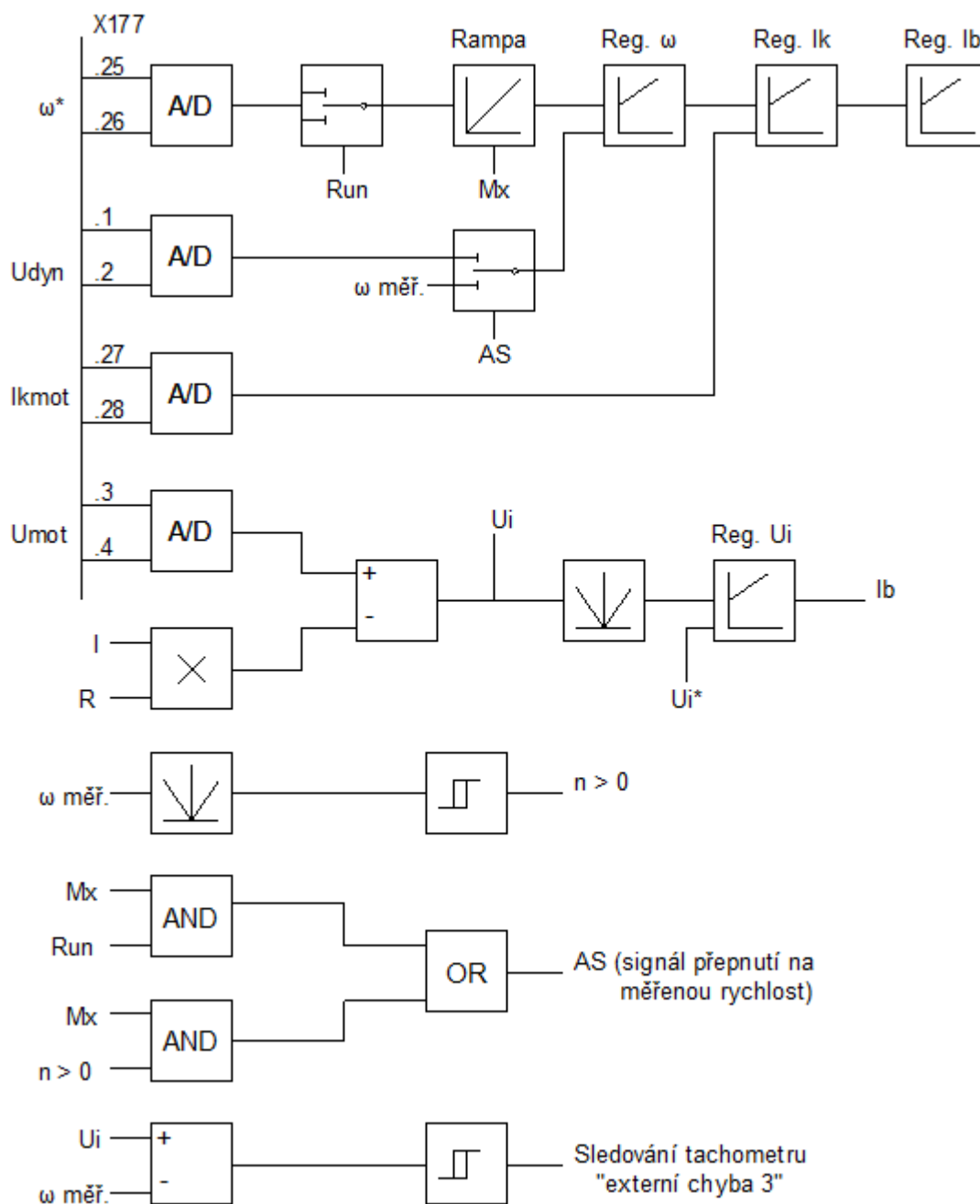
Postup při zapnutí:

- 1) Sepnutí kontaktu ON/OFF1. Regulátory buzení motoru a dynamu se zapnou a napětí dynamu je regulováno na nulu.
- 2) Sepnutí spínače M. Uzavře se kotevní obvod, napětí dynamu je stále regulováno na nulu.
- 3) Sepnutí kontaktu RUN. Motor se rozběhne po předem nastavené rampě na požadované otáčky.
- 4) Přepnutí přepínače AS. Rychlost bude regulována pomocí zpětné vazby.

Postup při vypnutí:

- 1) Nastavení požadované rychlosti na nulu nebo rozpojení kontaktu RUN. Při rozpojení kontaktu RUN se nastaví požadované otáčky na nulu a motor zastaví po předem nastavené rampě.
- 2) Při rozpojení spínače kotevního obvodu M přejde dynamo do režimu nulového napětí.

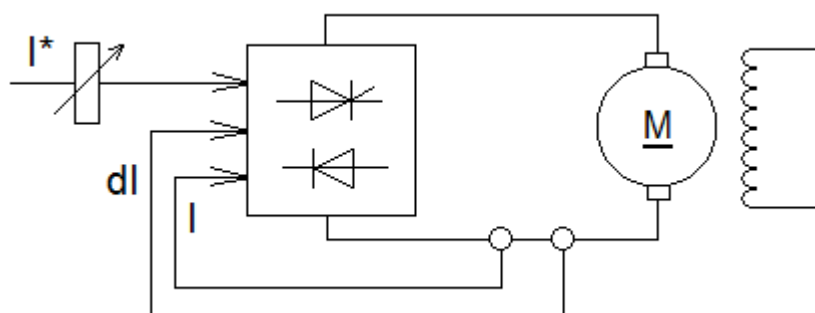
- 3) Rozpojením kontaktu ON/OFF1 se vypnou regulátory a zakážou spouštěcí pulzy (pole dynama je nulové). Pole motoru je vypnuto pomocí rovnocenného spojení měničů (komunikace peer-to-peer).



Obr. 2-4 – Blokové schéma regulace pole dynama při malé tyristorizaci [5]

2.3 Kompletní modernizace pohonu

Kompletní modernizace všech pohonů, tzv. „velká tyristorizace“ je technicky lepším, ale finančně náročnějším řešením. Jedná se o výměnu většiny komponent pohonů. Zachovány bývají zpravidla pouze stejnosměrné motory. Tento způsob modernizace je naznačen na Obr. 2-5. V případě, že tyto motory nejsou uzpůsobeny pro napájení z tyristorových měničů (nemají listěné jho statoru), je nutné redukovat jejich jmenovité hodnoty. Obvykle se snižuje jmenovitá a maximální povolená hodnota proudu a výkonu o 10%. Další možností je jejich nahrazení motory umožňujícími napájení z měničů, ať už stejnosměrnými nebo střídavými.



Obr. 2-5- Pohon s měničem pro řízení kotvy motoru

Při použití regulačních prostředků s pomalými časovými konstantami (např. $\tau = 0,5$ s) dostaneme změny proudu nejvýše $4 I_N/s$. Při použití moderní regulační techniky, se zkrátí časové konstanty (např. na $\tau = 0,1$ s) a dostanou se změny proudu až $10 I_N/s$. Zde může při použití běžných konstrukcí magnetického obvodu nastat pozdní odezva této změny u komutačních pólů, což bude mít vliv na špatnou komutaci a stroj bude jiskřit. [6]

Z výše uvedeného je vidět, že moderní regulační technika má velké požadavky na konstrukci strojů. Náhrada W-L soustrojí tyristorovým měničem dále vyžaduje napájecí síť s dostatečně velkým zkratovým výkonem, především u pohonů s velkými momentovými rázy. Kromě vlastního měniče je třeba pořídit i předřadný transformátor, vyhlazovací tlumivku a kompenzaci vyšších harmonických v napájecí síti.

Provedení tohoto způsobu modernizace je popsáno pro konkrétní případ v následující kapitole.

3 Modernizace základních pohonů válcovací tratě Kvarto

3.1 Válcovací trať s tahovými navíjedly

3.1.1 Popis válcovací tratě

Válcovací trať kvarto s tahovými navíjedly slouží pro válcování měděných nebo mosazných ploštín a pásů. Jedná se o vratnou stolici, s navíjecími bubny na obou stranách, pracujícími střídavě jako tahové navíjedlo nebo odvíjedlo. Válcování probíhá tak, že materiál vstupuje mezi válce, mezi nimiž je šterbina menší, než je příslušný rozměr váleného materiálu. Poměr šířky šterbiny k tloušťce materiálu se nazývá úběr. [6]

Nastavování velikosti válcovací šterbiny se provádí pomocí elektrohydraulického stavění válců. Měřiče tloušťky slouží k regulaci tloušťky válcovaného materiálu a výpočtu velikosti válcovací mezery.

Stolice musí být plynule regulována od nulových do maximálních otáček. Technologicky je nutné dosáhnout v pásu požadovaného tahu, který může obsluha upravit jeho zvýšením nebo snížením. Navíjedlo musí být plynule regulováno od nuly do maxima s automatickou regulací na konstantní tah v pásu po celý cyklus válcování.

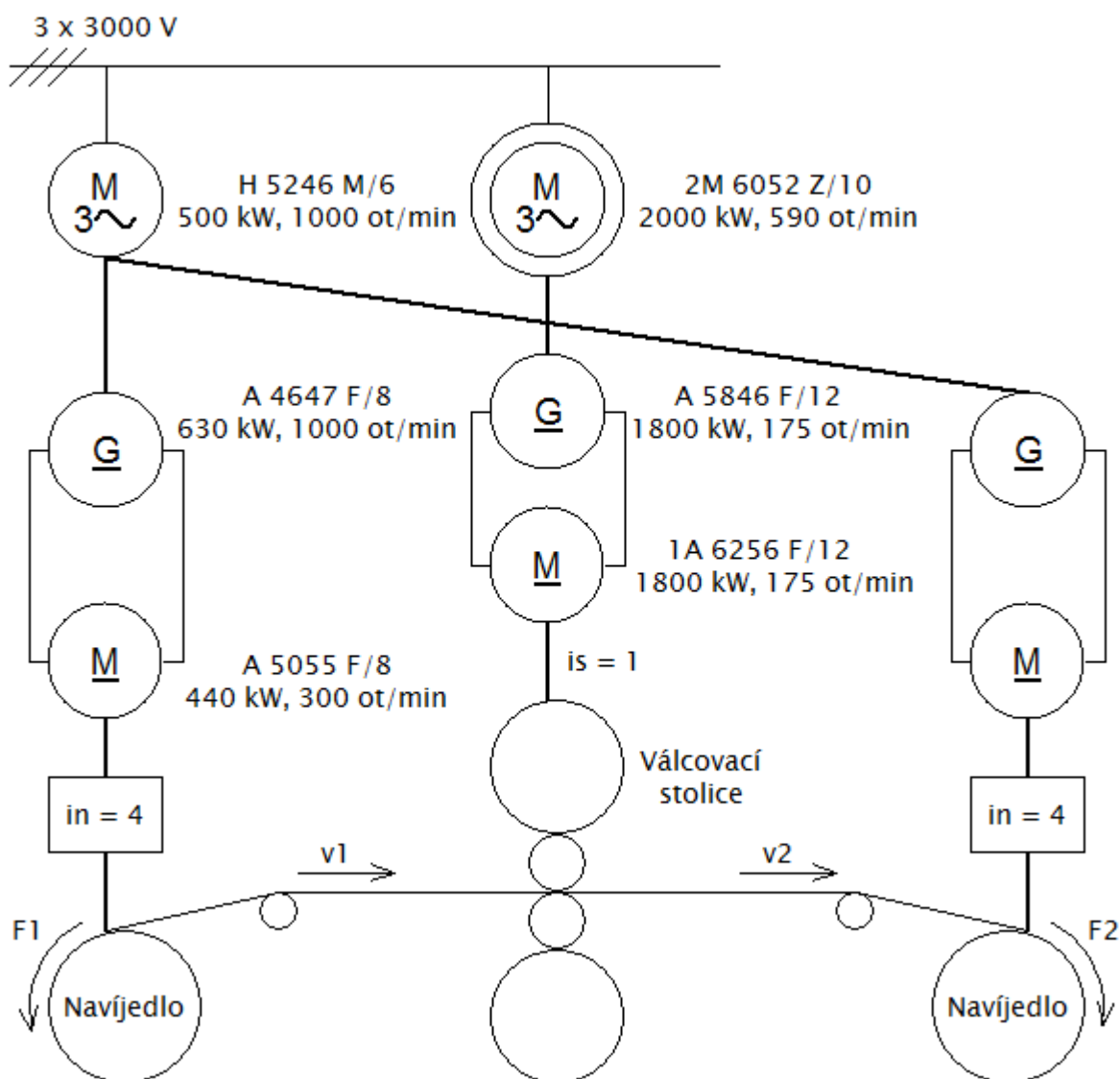
3.1.2 Popis původních pohonů válcovací tratě

Původní pohony válcovací tratě jsou složeny z W-L soustrojí, viz Obr. 3-1. Všechny instalované stroje byly vyrobeny v 60. letech v plzeňském závodě Škoda. Válcovací stolice je poháněna stejnosměrným motorem typu 1A 6256 F/12, který je napájen z dynama A 5846 F/12. Hřídel dynama je hnána asynchronním motorem s kroužkovou kotvou typu 2M 6052 Z/10 o výkonu 2000 kW a jmenovitých otáčkách 590 ot/min.

Navíjedla jsou poháněna rovněž stejnosměrnými motory typu A 5055 F/8. Dynama jsou typu A 4647 F/8. Obě dynama jsou poháněna jedním synchronním motorem H 5246 M/6 o výkonu 500 kW a jmenovitých otáčkách 1000 ot/min.

Střídavé motory jsou napájeny ze sítě 3 x 3000 V, 50 Hz.

Parametry jednotlivých motorů a dynam jsou udány v kapitole 3.1.5.



Obr. 3-1 – Schéma původního pohonu válcovny

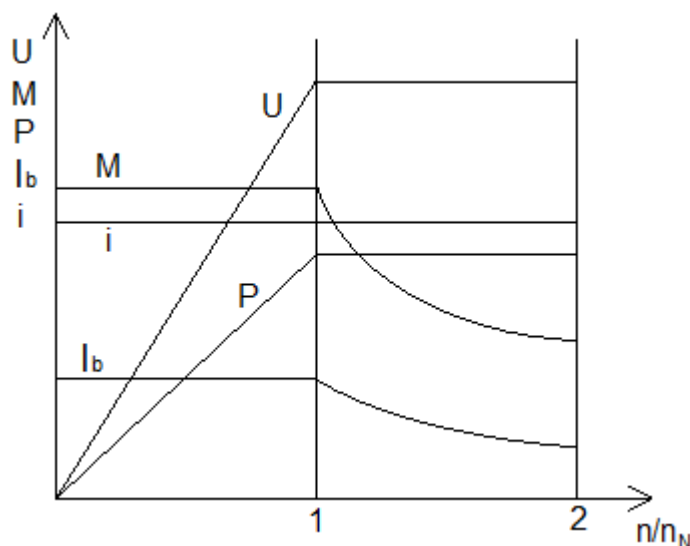
3.1.3 Požadavky na elektrický pohon

Nejdůležitějšími požadavky na elektrický pohon válcovací stolice jsou:

- velká provozní spolehlivost
- krátkodobá velká přetížitelnost (rázy)
- regulovatelnost otáček se zřetelem k prodloužení materiálu (bývá 9 až 12 násobné)
- rychlé spouštění, rychlé brzdění a rychlá reverzace
- lehké řízení otáček
- dobrá účinnost, minimální údržba

Těmto požadavkům vyhovuje například pomaloběžný stejnosměrný motor, jehož otáčky jsou stejné jako otáčky válců.

Při regulaci odbuzováním by měl být výkon konstantní, má-li být zachován konstantní kotevní proud, tj. stejné oteplovací podmínky. Průběh zatěžovacích veličin pro tuto podmínku je na Obr. 3-2. Pro hodnoty maximálního výkonu často nelze tuto podmínku splnit a kotevní proud se snižuje. Maximální proud, při němž je při chodu na základní otáčky chod bez jiskření, může totiž při vysokých otáčkách způsobit jiskření. [6]



Obr. 3-2 - Charakteristiky stejnosměrného motoru při konstantním kotevním proudu v závislosti na otáčkách

3.1.4 Popis tahového navíjeďla

Výsledná tloušťka a jakost válcovaného pásu závisí nejen na úběru, nýbrž též na tahu v pásu a rychlosti válcování. Extrémně malá nebo velká rychlost válcování má negativní vliv na regulaci tloušťky. Tah vyvozený bubnem jednak usnadňuje válcování tím, že zmenšuje tlak kovu na válce stolice a jednak je nutný pro správný technologický postup válcování a umožňuje správné a těsné navinutí svitku. Musí pracovat při různých rychlostech válcovaného materiálu. [6]

Požadavky na pohon tahových navíjeďel [6]:

- samostatný chod navíjeďla a stolice v obou směrech obvykle s menší, tzv. zaváděcí, pevně přednastavenou rychlostí, což je potřebné při zavádění pásu,
- nastavení tahu v pásu při zastavené válcovací stolici v rozsahu podle požadovaných druhů válcovaných pásů,
- udržovat nastavený tah stálý během rozběhu, válcování a brzdění, popř. odstranit chyby v tahu způsobené urychlováním (zpomalováním) setrvačných hmot,

- možnost válcování při různých rychlostech, nastavenou rychlost udržovat během válcování stálou.

Základní podmínkou regulace je, že otáčky navíjedla, popř. odvíjedla, závisí na rychlosti válcovaného pásu v a na průměru D navíjeného nebo odvíjeného svitku [6]:

$$\omega = \frac{2v}{D} \quad (3.1)$$

Protože rychlost pásu v je stálá, mění se otáčky podle průměru svitku. To znamená, že navíjedlo začne navíjet při nejmenším průměru D_{min} , tj. při největších otáčkách, a během navíjení otáčky klesají podle zvětšujícího se průměru D . Odvíjedlo začíná s nejnižšími otáčkami, největším průměrem svitku D_{max} , a končí s největšími otáčkami, nejmenším průměrem svitku D_{min} . Odvíjedlo brzdí, motor pracuje v generátorickém režimu.

Sít dodává jen rozdíl výkonů navíjedla a odvíjedla, který vznikne z nestejných tahů a rychlostí před stolicí a za stolicí, a energii ke krytí ztrát všech stejnosměrných strojů. Sít tedy nedodává součet těchto výkonů.

Výkon závisí jednak na velikosti žádaného tahu F , který se má pro určitý rozměr pásu a určitou jakost materiálu udržovat stálý, a jednak na rychlosti pásu v .

$$P = F \cdot v \quad (3.2)$$

Přitom je výkon dán momentem M a otáčkami motoru pohánějícího navíjedla.

$$P = M \cdot \omega \quad (3.3)$$

Pro určitý vývalek je součin $F \cdot v$ konstantní a tedy i výkon konstantní. Tento způsob regulace tedy probíhá při konstantním výkonu.

3.1.5 Technická data válcovací tratě

Parametry válcovací tratě

Kvarto trať je určena pro válcování měděných nebo mosazných plošin a pásů. Její základní parametry jsou:

Průměr pracovních válců: $D_{vp} = 0,43$ m (0,4 m po obroušení)

Průměr opěrných válců: $D_{vo} = 1,05$ m (1,0 m po obroušení)

Délka těla pracovních válců: $l_v = 1,2$ m

Max. rychlost válcování: $v_{max} = 3$ m/s

Max. rychlost navíjení: $v_{Nmax} = 3,3$ m/s

Max. tah v pásu:	$F_{\max} = 110 \text{ kN}$
Min. tah v pásu:	$F_{\min} = 20 \text{ kN}$
Max. průměr svitku:	$D_{\max} = 0,85 \text{ m}$
Min. průměr svitku:	$D_{\min} = 0,5 \text{ m}$
Max. šířka pásu:	$B_{\max} = 1,05 \text{ m}$
Min. šířka pásu:	$B_{\min} = 0,5 \text{ m}$
Max. tloušťka pásu:	$H_{\max} = 4,5 \text{ mm}$
Min. tloušťka pásu:	$H_{\min} = 0,5 \text{ mm}$
Výkon motoru stolice	1 800 kW; 0 – 175 ot/min
Výkon motorů navíjedel	440 kW; 0 – 300 – 600 ot/min
Převod stolice	$i_S = 1$
Převod navíjedel	$i_N = 4$

Parametry motoru pro pohon stolice

Typ motoru	Škoda 1A6256 F/12
Jmenovitý výkon, napětí, proud	1 800 kW, 650 V, 3 000/6 000 A
Jmenovité otáčky, moment	175/350 ot/min, 98,2/49,1 kNm
Buzení při zapojení 2a = 1:	$I_{bn} = 18,5 \text{ A}$, $U_{bn} = 266 \text{ V}/80^\circ\text{C}$ $R_b = 11,6 \Omega/20^\circ\text{C}$, $L_b = 56,8 \text{ H}$, $\tau_b = 4,89 \text{ s}$
Moment setrvačnosti, hmotnost	$J_{\text{mot}} = 9 110 \text{ kgm}^2$, $G = 38 869 \text{ kg}$
Odpor, indukčnost, čas. konst.	$R_k = 5,17 \Omega$, $L_k = 0,3 \text{ mH}$, $\tau_k = 58 \text{ ms}$
Počet závitů	$N_z = 360$

Motor není konstruován pro napájení z tyristorového měniče. Bude-li takto napájen, je třeba zajistit dostatečné vyhlazení kotevního proudu. Doporučované zvlnění σ_{el} bývá kolem 4%. Dále se dle zkušeností snižují jmenovité hodnoty výkonu a kotevního proudu motoru asi o 10%. Kromě toho je ještě nutné omezit změny kotevního proudu na max. 10 In/s. Pak dostáváme:

Jmenovitý výkon motoru	$1 800 \cdot 0,9 = 1 620 \text{ kW}$
Jmenovitý/maximální proud motoru	$3 000/6 000 \cdot 0,9 = 2 700/5 400 \text{ A}$

Parametry motoru pro pohon navíjeďla

Typ motoru	Škoda A5055 F/8
Jmenovitý výkon, napětí, proud	440 kW, 500 V, 940/1 800 A
Jmenovité otáčky, moment	300/600 ot/min, 14/7 kNm
Buzení při zapojení 2a = 4:	$I_{bn} = 30 \text{ A}$, $U_{bn} = 68,4 \text{ V}/80^\circ\text{C}$ $R_b = 1,48 \text{ } \Omega/20^\circ\text{C}$, $L_b = 6,45 \text{ H}$, $\tau_b = 4,36 \text{ s}/20^\circ\text{C}$ $R_b = 1,48 \cdot 1,235 = 1,8278 \text{ } \Omega/80^\circ\text{C}$, $\tau_b = 3,5 \text{ s}/80^\circ\text{C}$
Moment setrvačnosti, hmotnost	$J_{mot} = 375 \text{ kgm}^2$, $G = 12\,355 \text{ kg}$
Odpor, indukčnost, čas. konst.	$R_k = 16,29 \text{ m}\Omega/20^\circ\text{C}$, $L_k = 0,707 \text{ mH}$, $\tau_k = 35 \text{ ms}/80^\circ\text{C}$ $R_k = 16,29 \cdot 1,235 = 20,118 \text{ } \Omega/80^\circ\text{C}$
Počet závitů	$N_z = 600$

Motor není konstruován pro napájení z tyristorového měniče. Bude-li takto napájen, je třeba zajistit dostatečné vyhlazení kotevního proudu. Doporučované zvlnění σ_{el} bývá kolem 4%. Dále se dle zkušeností snižují jmenovité hodnoty výkonu a kotevního proudu motoru asi o 10%. Kromě toho je ještě nutné omezit změny kotevního proudu na max. 10 In/s. Pak dostáváme:

Jmenovitý výkon motoru	$440 \cdot 0,9 = 396 \text{ kW}$
Jmenovitý/maximální proud motoru	$940/1\,800 \cdot 0,9 = 846/1\,620 \text{ A}$

Parametry mechaniky navíjeďla

Převod: $i_n = 4$

Moment setrvačnosti mechaniky redukováný na osu motoru:

$$J_{mech} = 230 \text{ kg.m}^2$$

Moment setrvačnosti svitku redukováný na osu motoru:

$$J_{sv \max} = 27 \text{ kg.m}^2 \text{ pro } B_{\max} = 1,076 \text{ m a } D_{\max} = 0,85 \text{ m}$$

$$J_{sv \text{ med}} = 20 \text{ kg.m}^2 \text{ pro } B_{\text{med}} = 0,8 \text{ m a } D_{\max} = 0,85 \text{ m}$$

$$J_{sv \min} = 12,6 \text{ kg.m}^2 \text{ pro } B_{\min} = 0,5 \text{ m a } D_{\max} = 0,85 \text{ m}$$

3.2 Koncepce modernizace

Po zvážení výhod a nevýhod možných způsobů modernizace válcovací tratě byla jako nejvhodnější zvolena metoda velké tyristorizace, protože v současných podmínkách je zpravidla častěji realizována z důvodů postupného dožívání starých zařízení s W-L soustrojími, která byla v provozu často více než 50 let a jejichž opravy by již vyžadovaly velké investice.

Mechanické parametry válcovací tratě zůstanou zachovány, neboť se nemění výkony motorů. Několikanásobně se však zvýší přesnost v dodržení nastavených tahů a rychlostí ve všech režimech chodu tratě. Bude možno zrychlit zásahy regulátoru tloušťky pásu a tedy i zatím limitovanou rychlost válcování a tím zvýšit produkci válcovací trati.

Z požadované maximální rychlosti válcování se vypočítá maximální provozní rychlost motoru pohánějícího válcovací stolicí:

$$n_{p \max \text{ stol.}} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 3}{\pi \cdot 0,4} = 143 \text{ ot/min} \quad (3.4)$$

Maximální provozní otáčky motoru stolice jsou nižší než jmenovité otáčky tohoto motoru. Regulace pohonu stolice se tedy bude provádět pouze regulací napětí kotvy.

Z požadované maximální rychlosti navíjení se vypočítá maximální provozní rychlost motoru pohánějícího tahové navíjedlo:

$$n_{p \max \text{ nav.}} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 3,3}{\pi \cdot 0,5} = 504 \text{ ot/min} \quad (3.5)$$

Maximální provozní otáčky motoru navíjedla jsou vyšší než jmenovité otáčky tohoto motoru. Regulace pohonu navíjedla se tedy bude provádět regulací napětí kotvy do jmenovitých otáček motoru a pro vyšší otáčky odbuzováním.

3.3 Modernizace pohonu válcovací stolice

3.3.1 Měnič pro napájení motoru

Jedná se o přímé napájení stejnosměrného motoru z tyristorového měniče. Všechny části W-L soustrojí jsou nahrazeny stejnosměrným měničem.

Ze zatěžovacího diagramu, zobrazeném v diagramu v příloze, viz Příloha 2, je patrné, že motor stolice je při válcování běžně zatěžován momentem 85 kNm. Tento moment je mírně menší než jmenovitý moment motoru po korekci. Běžný kotevní proud motoru tedy bude také menší než jmenovitý proud motoru po korekci. Tyristorový měnič pak bude vhodné nadimenzovat na tento korigovaný proud. Aby byla ponechána dostatečná proudová rezerva pro dynamické stavy motoru, například při rozběhu stolice, měl by být vybraný měnič dále schopen dát redukovaný maximální proud motoru po dobu cca 10 s. Toto zatížení uvažovaný motor dle informací výrobce běžně vydrží, viz Tabulka 3-1.

Dle katalogu Siemens D 23.1 2010 žádný stejnosměrný měnič neodpovídá požadavku na jmenovité zatížení motoru 2 700 A. Proto je nutné zařadit dva měniče paralelně. V tomto zapojení již parametrům daného motoru odpovídá čtyřkvadrantový stejnosměrný měnič Sinamics DCM 6RA8095-4KV62-0AA0.

Parametry měniče

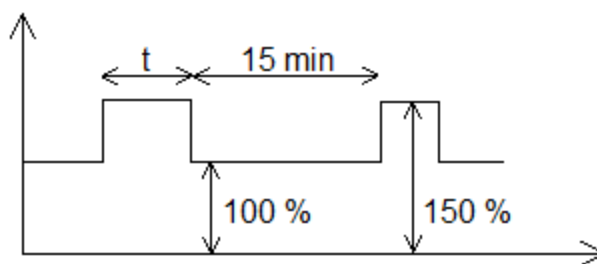
$U = 690 \text{ V}$	3f AC napájecí napětí kotvy
$U_N = 725 \text{ V}$	jmenovité stejnosměrné napětí měniče
$I_N = 2\,000 \text{ A}$	jmenovitý stejnosměrný proud měniče
1,8 I_N	proudová přetížitelnost měniče
$P = 1\,450 \text{ kW}$	výkon měniče
$U_b = \text{max. } 390 \text{ V}$	stejnosemřné budící napětí
$I_b = 40 \text{ A}$	stejnosemřný budící proud

Přetížitelnost měniče

teplota	t – doba přetížení	$I_{\text{přetěžovací}}$ po dobu t	$I_{100\%}$ po dobu 15 min
40°C	60 s	2383 A	1589 A
40°C	120 s	2283 A	1522 A
40°C	10 s	3011 A	1505 A
45°C	60 s	2255 A	1503 A

Tabulka 3-1 – Tabulka zatěžovacích cyklů měniče 6RA8095-4KV62-0AA0

Trvalý proud měniče je 2 000 A.



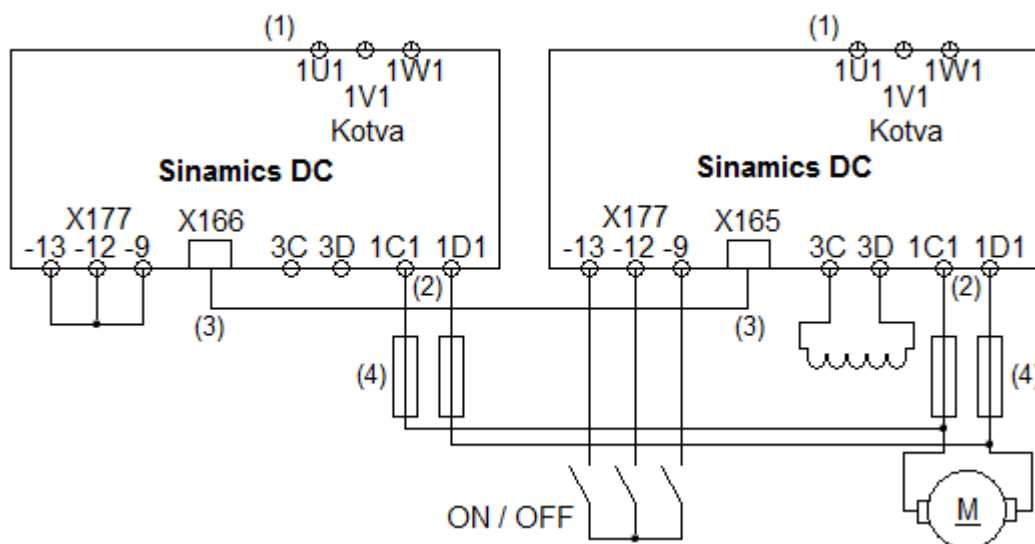
Obr. 3-3 – Dynamická přetížitelnost

Paralelní zapojení měničů

Při paralelním zapojení měničů bude přetížitelnost $I = 2 I_N$.

Podmínky paralelního zapojení:

- (1) stejný sled fází 1U1/ 1V1/ 1W1
- (2) stejný sled fází 1C1/ 1D1
- (3) propojení svorkovnic X165 a X166 8 pinovým stíněným kabelem
- (4) instalace pojistek kotevního obvodu na stejnosměrné straně u čtyřkvadrantových jednotek do 850 A



Obr. 3-4 - Paralelní zapojení měničů

Výkonová jednotka měniče obsahuje kromě měniče pro napájení kotvy motoru (svorky 1C1 a 1D1) ještě svorky (3C a 3D) umožňující napájení buzení motoru. Potřebný budicí proud motoru je 18,5 A a napětí 266 V. Parametry měniče jsou 40 A a 390 V. Jeden z měničů lze tedy využít zároveň pro buzení motoru.

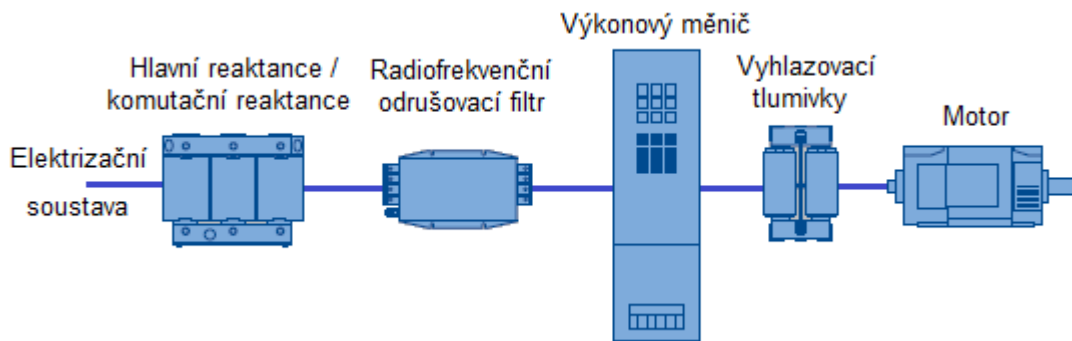
3.3.2 Síťové pojistky

U čtyřkvadrantových měničů se jmenovitým proudem pro obvod kotvy nad 850 A nejsou vyžadovány fázové a DC pojistky. Kotevní pojistky jsou integrovány v měniči. Je tedy potřeba jen vybrat fázové pojistky pro obvod budicího vinutí.

Podle parametrů měniče ($I_d = 2\ 000\ \text{A}$ a $I_b = 40\ \text{A}$) se vyberou dvě pojistky typu 3NE1802-0.

3.3.3 Měničový transformátor, komutační tlumivky

Měnič musí být vždy připojen k síťovému napájení přes komutační tlumivky. Tyto musí mít alespoň 4% u_K . Komutační indukčnost může být buď v podobě měničového transformátoru, nebo v podobě komutační tlumivky.



Obr. 3-5 – Tlumivky a filtry používané pro stejnosměrný pohon [7]

Měničový transformátor

Hlavním důvodem použití transformátoru je dosažení potřebné velikosti usměrněného napětí. Rozptylová reaktance transformátoru je výhodná při komutaci, omezuje totiž nepříznivé působení usměrňovače na napájecí síť. Každá komutace představuje pro měničový transformátor zkrat, při němž je výstupní napětí transformátoru nulové a v místě připojení transformátoru k síti je pokles napětí tím menší, čím větší je reaktance transformátoru. [8]

S ohledem na požadované zvlnění napětí v místě připojení transformátoru by měl být poměr zkratového výkonu sítě ku zkratovému výkonu transformátoru minimálně:

$$\frac{S_K}{S_T} = 30 \div 150 \quad (3.6)$$

Přímé připojení usměrňovače na síť je nepřijatelné.

Transformátor je třeba dimenzovat na celkový proud procházející transformátorem, ačkoli na činném výkonu odebíraném stejnosměrnou zátěží se podílí jen 1. harmonická proudu odebíraného ze sítě. Výkon, na který je nutno transformátor dimenzovat, je tedy o něco větší než výkon odebíraný zátěží. [8]

Typový výkon transformátoru:

$$S_{TN} = \frac{S_P + S_S}{2} = K_T P_{dN} \quad (3.7)$$

S_P/S_S ... zdánlivý výkon, na který je nutno dimenzovat primární/sekundární vinutí

P_{dN} ... jmenovitý výkon odebíraný stejnosměrnou zátěží

K_T ... poměrný typový výkon transformátoru

Platí vztahy:

$$S_S = 3 \cdot U_S \cdot I_{SN} = 3 \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_{di0} \cdot 0,818 I_d = 1,05 P_{dN} \quad (3.8)$$

$$S_P = 3 \cdot U_P \cdot I_{PN} = 3 \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_{di0} \cdot 0,818 I_d = 1,05 P_{dN} \quad (3.9)$$

$$S_{TN} = \frac{S_P + S_S}{2} = \frac{1,05 + 1,05}{2} \cdot P_{dN} = 1,05 P_{dN} \quad (3.10)$$

Poměrný typový výkon transformátoru potom vyjde:

$$K_T = 1,05 \quad (3.11)$$

Jmenovitý výkon odebíraný stejnosměrnou zátěží:

$$P_{dN} = U \cdot I = 650 \cdot 2\,700 = 1\,755 \text{ kW} \quad (3.12)$$

Potřebný typový výkon transformátoru potom vychází:

$$S_{TN1} = K_T P_{dN} = 1,05 \cdot 1\,755 = 1\,842,75 \text{ kVA} \quad (3.13)$$

Transformátor se nechá vyrobit na zakázku. Jedná se o trojvinutový třífázový transformátor typu Yy0Yd11 o výkonu 1 900 kVA. Primární vinutí je napájeno 3 kV, napětí sekundárních vinutí je 650 V.

Komutační tlumivky

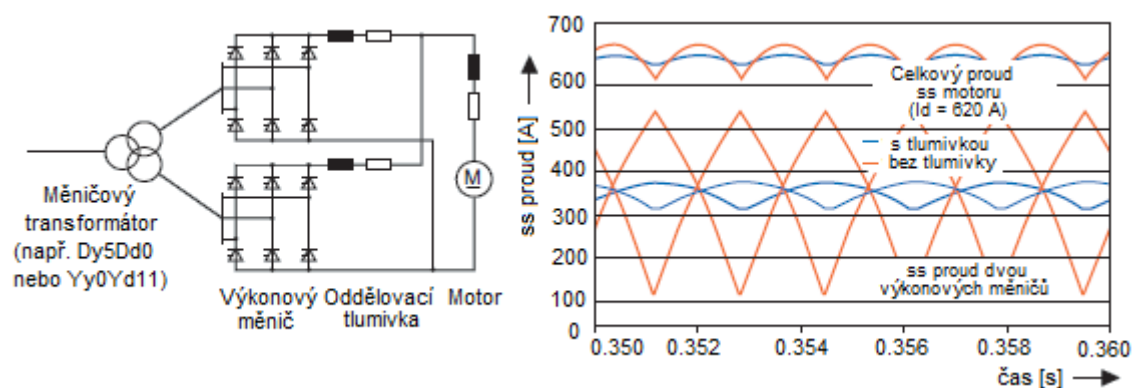
Pokud jsou na měničovém transformátoru připojeny ještě další zátěže, je nutné zařadit před měnič i komutační tlumivky.

Pro napájení kotvy není nutné vkládat komutační tlumivku.

Komutační tlumivku je nutné zařadit do obvodu napájení buzení. V tomto případě se jedná o 1f tlumivku pro napájení 400 V a 50 Hz. Podle jmenovitého proudu buzení $I_b = 18,5 \text{ A}$ byla vybrána tlumivka 4EM50 05-6CB00, jejíž proud $I_{thmax} = 18 \text{ A}$ a $I_{dN} = 22 \text{ A}$.

3.3.4 Vyhlažovací tlumivky

Vyhlažovací tlumivky spolehlivě snižují zvlnění proudu v obvodu motoru. Použití tlumivek pro zrušení vazby dvou výkonových měničů umožňuje paralelní chod dvou 6-pulsních usměrňovačů, vytvářejících 12-pulsní rušení na primární straně transformátoru. Tyto tlumivky výrazně omezují síťové harmonické a tím zlepšují podmínky výkonového zdroje. Obr. 3-6 znázorňuje snížení zvlnění proudu pomocí vyhlažovacích tlumivek.



Obr. 3-6- Snížení zvlnění proudu pomocí vyhlažovacích tlumivek [7]

Za každý z měničů se zařadí jedna tlumivka. Redukovaný jmenovitý proud motoru je 2 700 A, každým z měničů tedy poteče při jmenovitém chodu 1 350 A.

Dle vzorce firmy Siemens se velikost indukčnosti jednotlivých tlumivek pro 12-pulsní zapojení vypočítá nejprve pro $0,2 I_{dN}$ a poté pro I_{dmax} [9]:

$$L_{v1} = \frac{0,296 \cdot 10^{-3} \cdot U_{di0}}{0,2 \cdot I_{dN}} = \frac{0,296 \cdot 10^{-3} \cdot 1,35 \cdot 650}{0,2 \cdot \frac{2\,700}{2}} \quad (3.14)$$

$$= 0,96 \text{ mH}$$

$$L_{v2} = \frac{0,296 \cdot 10^{-3} \cdot U_{di0}}{0,33 \cdot I_{dmax}} = \frac{0,296 \cdot 10^{-3} \cdot 1,35 \cdot 650}{0,33 \cdot \frac{5\,400}{2}} \quad (3.15)$$

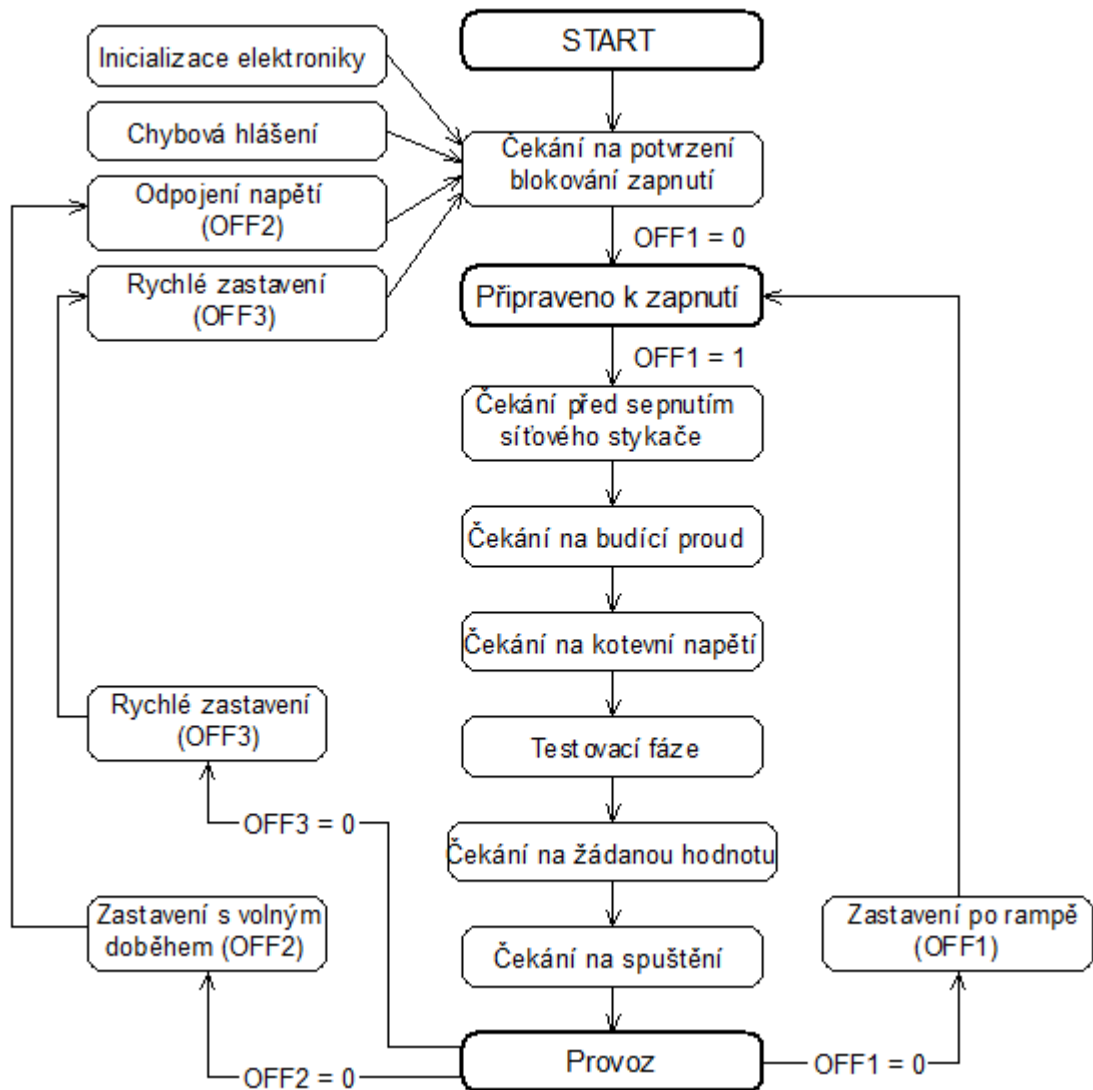
$$= 0,29 \text{ mH}$$

Obě tlumivky se nechají vyrobit na zakázku. Každá z tlumivek musí být dimenzována na polovinu jmenovitého proudu motoru, tedy 1 350 A. Maximální proud tlumivkou by měl odpovídat polovině maximálního proudu motoru, tedy 2 700 A. Napětí tlumivky je shodné s napětím motoru 650 V.

3.3.5 Popis činnosti měniče

Stisknutím tlačítka START se zapne pomocné napájení pro řídicí jednotku. Napětí je před stykačem. V inicializačních stavech se vyhodnotí počáteční podmínky spuštění (stykač sepnut, porucha měniče, blokování měniče, zapnutí ventilace měniče). Regulátor buzení motoru se zapne a napětí je regulováno na nulu.

Jsou-li všechny komponenty připraveny a není-li blokováno zapnutí, je měnič připraven k zapnutí. V této fázi je možné zvolit požadovanou rychlost válcování nebo režim tipování (manipulační rychlost). Při tipování měnič běží jen po dobu, kdy je stisknuté tlačítko. Nastavení rychlosti lze provést buď digitálně pomocí dvou tlačítek pro zvýšení a snížení rychlosti, nebo analogově potenciometrem. Stiskneme-li nyní tlačítko ON, motor se rozběhne po předem nastavené rampě na požadované otáčky.



Obr. 3-7 – Funkční diagram měniče

Stisknutím tlačítka OFF se zruší žádané otáčky. Motor sjíždí po předem nastavené rampě až na nulové otáčky a je zabrzděn mechanickou brzdou. V této fázi měnič udržuje nulové otáčky a moment, dokud nedostane zpětnou vazbu od brzdy. Jakmile dostane potvrzení, že motor je mechanicky zabrzděn, měnič se sám odpojí a přejde do stavu „připraveno k zapnutí“.

Je-li potřeba co nejrychleji zastavit motor, použije se rychlé zastavení OFF3. V tomto případě pohon zastavuje po zrychlené rampě nastavené pro OFF3. V případě vyhodnocení poruchy je motor automaticky vypnut po zrychlené rampě nebo je použito nouzové zastavení OFF2.

Při použití nouzového zastavení OFF2 jsou zakázány pulzy střídače a měnič je vypnut elektricky. Při tomto vypnutí motor volně dobíhá. Tento způsob vypínání se používá jen v případě, vyhodnotí-li měnič závažnou poruchu pohonu, a je proveden automaticky nebo v případě nouzových situací.

Nastane-li porucha jakékoli části pohonu, dostane se měnič do stavu „fault“, tedy „porucha“. Po odstranění závady musíme poruchu kvitovat, tzn. potvrdit měniči, že o poruše víme a že byla odstraněna.

3.3.6 Řízení a ovládání měniče

Řízení měniče je zajištěno řídicí jednotkou CUD. Výkonová část měniče se skládá z reverzního usměrňovače, ze kterého je napájena kotva motoru, a z jednoduchého usměrňovače určeného pro napájení buzení motoru. Na vstup měniče se přivádí třífázové napájecí napětí, které je usměrněno v usměrňovači.

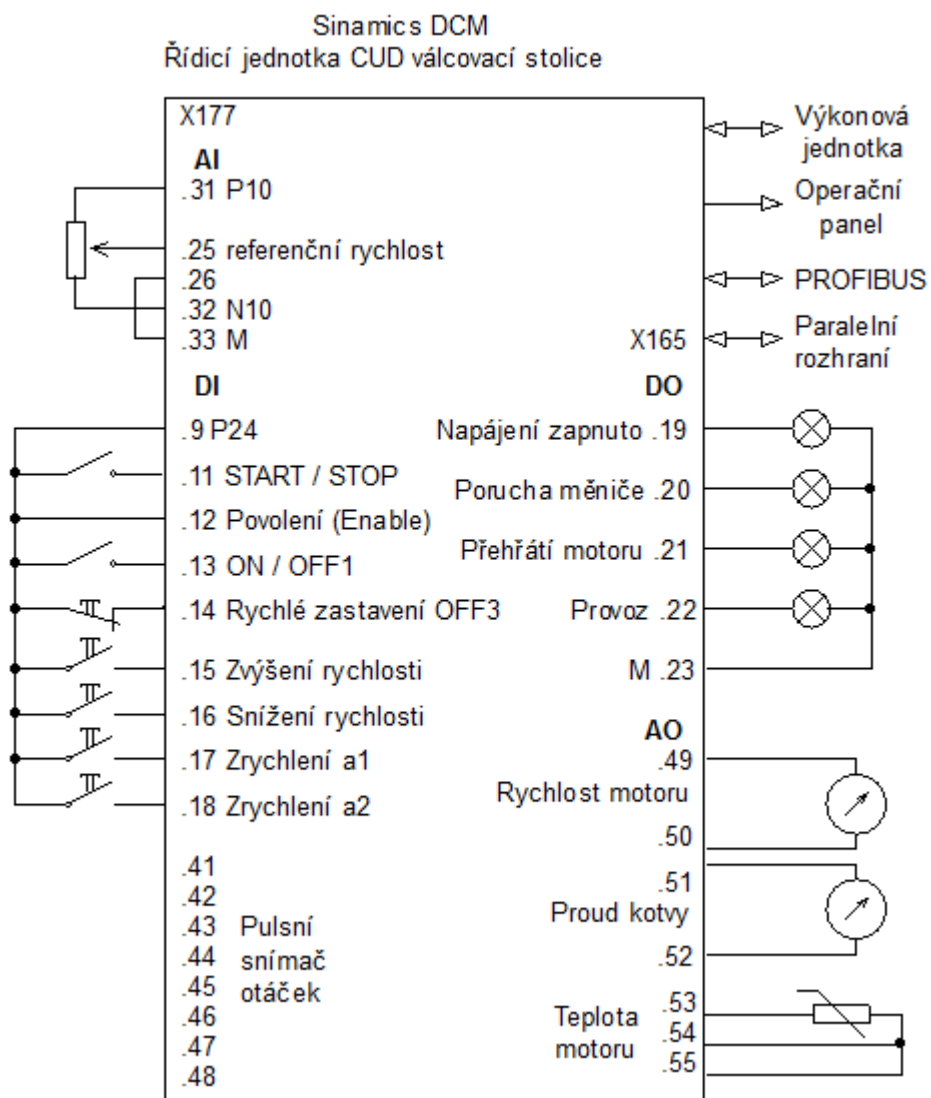
Pohon válcovací stolice sestává ze dvou paralelně zapojených měničů. Každý z měničů je řízen samostatnou řídicí jednotkou, které jsou mezi sebou propojeny pomocí paralelního rozhraní (svorkovnice X165 a X166). Měniče a řídicí systém spolu komunikují pomocí sériového rozhraní s protokolem PROFIBUS.

Řídicí jednotka CUD

Řídicí jednotka CUD včetně zapojení analogových a digitálních vstupů a výstupů je zobrazena na Obr. 3-8. Obsahuje konektor pro připojení výkonového modulu, paralelní rozhraní pro připojení k druhé řídicí jednotce, sériové rozhraní s protokolem PROFIBUS a rozhraní pro připojení ovládacího panelu (podrobněji viz níže). Řídicí jednotka umí

vyhodnocovat signály z inkrementálního snímače otáček (svorky 41 - 48). Svorka 53 slouží k připojení senzoru teploty motoru.

Svorkovnice X177 obsahuje 4 nastavitelné digitální vstupy, 4 nastavitelné obousměrné digitální vstupy/výstupy a 4 nastavitelné digitální výstupy. K této svorkovnici se připojí tlačítko START/STOP pro zapnutí/vypnutí napájení měniče, tlačítko ON/OFF1 pro zapnutí/vypnutí motoru (válcování) a nouzové zastavení OFF3. Další digitální vstupy slouží k zadávání požadované velikosti rychlosti válcování a nastavení úrovně zrychlení pohonu. Požadovanou rychlost lze zadávat i plynule analogovým vstupem. Digitálním vstupem „Povolení (Enable)“ získává měnič informaci o vyhodnocení vstupních podmínek zapnutí motoru a může přejít do stavu „Připraveno k zapnutí“.



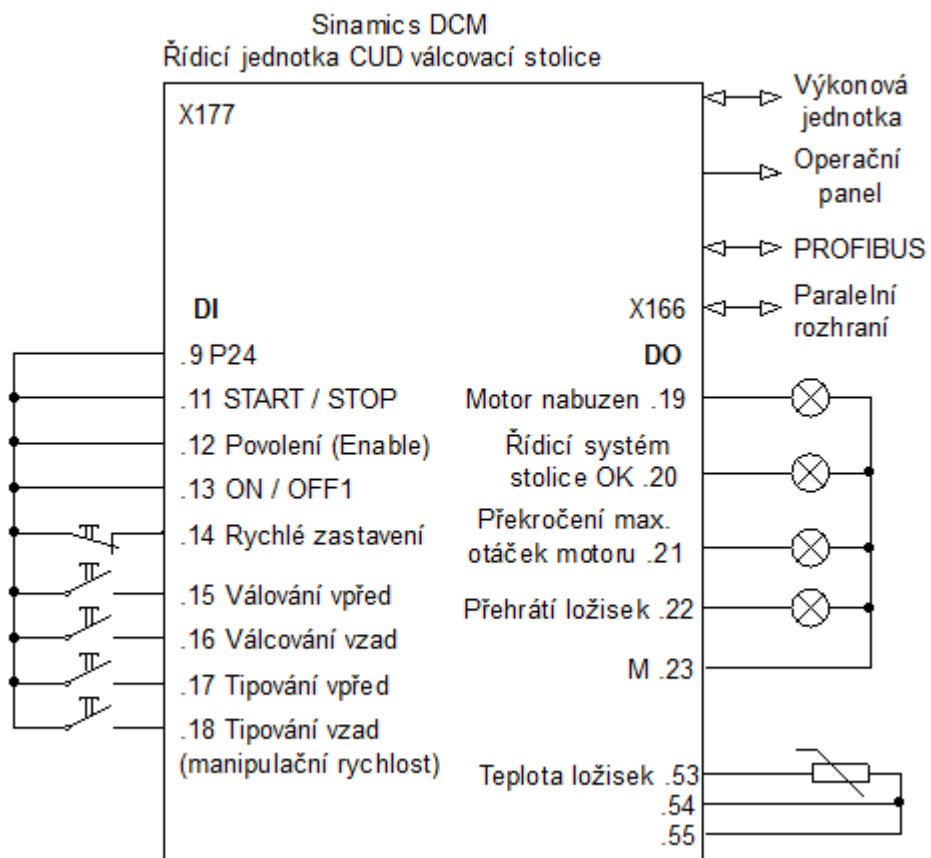
Obr. 3-8 – Řídicí jednotka CUD

Digitální výstupy slouží k indikování stavu řídicí jednotky pomocí světelných signálů. Signalizovány jsou následující stavy: zapnutí napájení měniče, porucha měniče, přehřátí motoru a provoz. Analogový výstup slouží k zobrazení zadané rychlosti motoru a velikosti kotevního proudu.

Všechna nastavení a parametry jsou uloženy na kompaktní Flash kartě připojené přímo k řídicí jednotce.

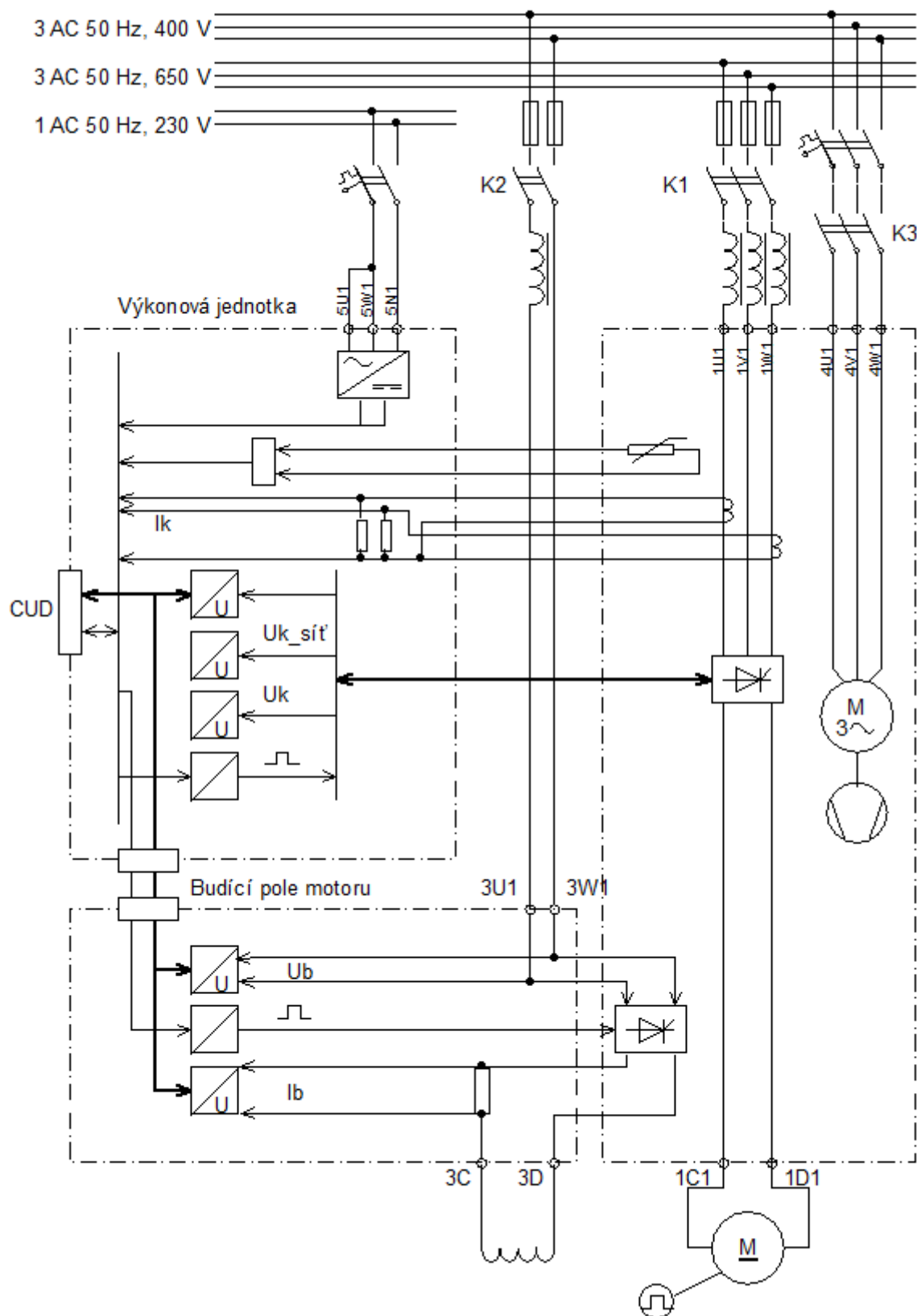
Druhý měnič je řízen samostatnou řídicí jednotkou, viz Obr. 3-9. Tato obsahuje další digitální vstupy, které jsou využity k volbě směru válcování a režimu tipování (pevně přednastavené manipulační rychlosti). Signál o zapnutí nebo vypnutí měniče a pohonu stolice je mezi jednotlivými měniči přenášen pomocí rozhraní Profibus.

Pomocí digitálních výstupů jsou signalizovány další stavy pohonu – nabuzení motoru, překročení maximálních otáček motoru, přehřátí ložisek a bezporuchový provoz řídicího systému.



Obr. 3-9 – Řídicí jednotka CUD pro druhý měnič

Výkonová jednotka jednotlivých měničů je znázorněna na Obr. 3-10. Vnitřní struktura zapojení je pro oba měniče stejná. Stejnoseměrný motor a napájení budícího vinutí je připojeno k paralelně zapojeným výkonovým jednotkám dle Obr. 3-4.

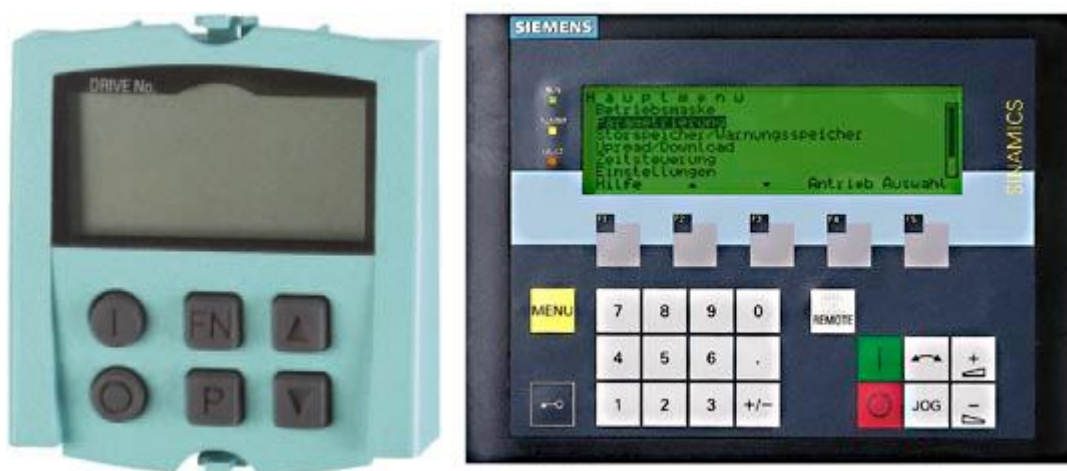


Obr. 3-10 – Výkonový modul

Operační panel

Pro nastavování parametrů měniče, čtení chybových hlášení a kvitaci chyb lze použít operační panel umístěný přímo na řídicí jednotce. Je možné použít dvě varianty operačního panelu. Základní operační panel BOP20 obsahuje dvouřádkový display, 6 tlačítek a na zadní straně konektor pro připojení k řídicí jednotce.

Rozšířený operační panel AOP30 má přehlednější víceřádkový display, je ovládán 26 tlačítky. Pracovní status řídicí jednotky je signalizován čtyřmi LED diodami.



Obr. 3-11 – Operační panel BOP20 a AOP30

Regulační struktura

Regulační struktura použitá v měniči je znázorněna v příloze, viz Příloha 1. Cílem této kapitoly není detailně popisovat tuto strukturu. Návrhu regulátorů a regulační struktury válcovací stolice je věnována kapitola 3.5.

3.4 Modernizace pohonu tahového navíjedla

3.4.1 Výpočet potřebných momentů a otáček navíjedla

Výpočet otáček navíjedla

Úhlová rychlost navíjedla při prázdném bubnu a navinutém plném svitku:

$$\omega_{Dmin} = \frac{2v}{D_{min}} \cdot i = \frac{2 \cdot 3,3}{0,5} \cdot 4 = 52,8 \text{ rad/s} \quad (3.16)$$

$$\omega_{Dmax} = \frac{2v}{D_{max}} \cdot i = \frac{2 \cdot 3,3}{0,85} \cdot 4 = 31 \text{ rad/s} \quad (3.17)$$

Otáčky navíjedla při prázdném bubnu a navinutém plném svitku:

$$n_{Dmin} = \frac{60 \omega_{min}}{2\pi} = \frac{60 \cdot 52,8}{2\pi} = 504 \text{ ot/min} \quad (3.18)$$

$$n_{Dmax} = \frac{60 \omega_{max}}{2\pi} = \frac{60 \cdot 31}{2\pi} = 296 \text{ ot/min} \quad (3.19)$$

Vypočtené otáčky souhlasí s hodnotami uvedenými v zatěžovacím diagramu uvedené v příloze, viz Příloha 3.

Momenty na navíjedle

Celkový moment, který musí motor navíjedla krýt je dán vztahem:

$$M = M_T + M_D + M_{ztrát.} = F \cdot \frac{D}{2} + J \frac{d\omega}{dt} + M_{ztrát.} \quad (3.20)$$

M_T ... tahový moment – moment potřebný pro vyvození požadovaného tahu v navíjeném pásu

M_D ... dynamický moment – moment potřebný pro zrychlení, případně zpomalení, mechaniky navíjedla včetně motoru

$M_{ztrát.}$... ztrátový moment v mechanice navíjedla. Zahrnuje například přídavný moment od tření v ložiskách nebo moment nutný pro ohnutí pásu větší tloušťky na průměr svitku. Tento moment nebývá velký a v následujících výpočtech bude zanedbán.

Výpočet tahového momentu

Tahový moment převedený na osu motoru se vypočítá podle vztahu:

$$M_T = F \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{i_N} \cdot \frac{1}{\eta} [Nm] \quad (3.21)$$

Tahový moment při maximálním tahu v pásu a prázdném bubnu navíjedla:

$$\begin{aligned} M_{T Dmin} &= F_{max} \cdot \frac{D_{min}}{2} \cdot \frac{1}{i_N} \cdot \frac{1}{\eta} = 110\,000 \cdot \frac{0,5}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{0,95} \\ &= 7\,237 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Tahový moment při maximálním tahu v pásu a plně navinutém svitku:

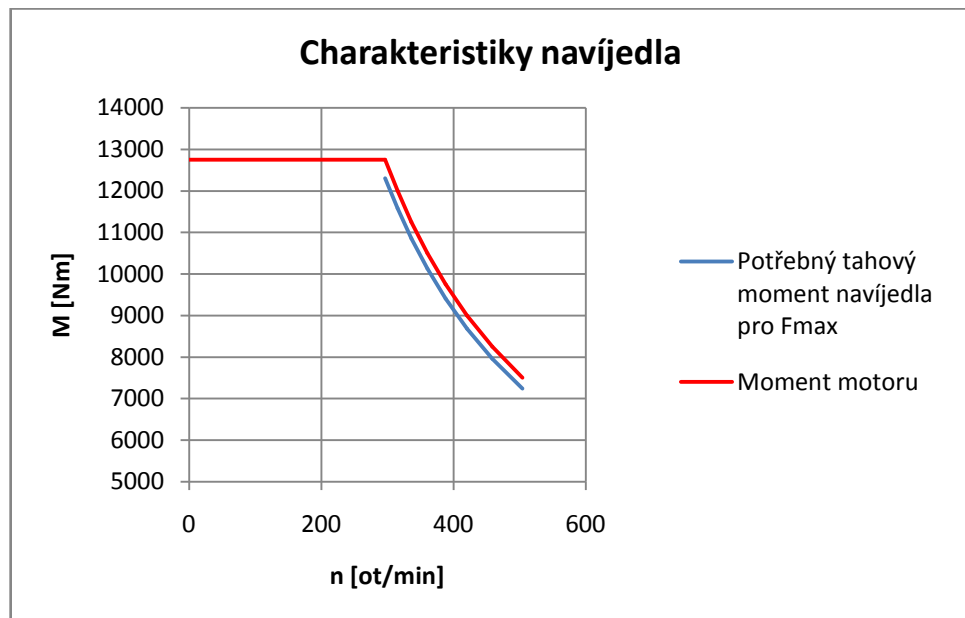
$$M_{T_{Dmax}} = F_{max} \cdot \frac{D_{max}}{2} \cdot \frac{1}{i_N} \cdot \frac{1}{\eta} = 110\,000 \cdot \frac{0,85}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{0,95} = 12\,303 \text{ Nm} \quad (3.23)$$

Spočtené momenty odpovídají momentům znázorněným v zatěžovacím diagramu, viz Příloha 3.

Pro další výpočty je nutné vypočítat minimální tahový moment při nejmenším tahu v pásu a prázdném bubnu navíjedla:

$$M_{T_{Dmin_Fmin}} = F_{min} \cdot \frac{D_{min}}{2} \cdot \frac{1}{i_N} \cdot \frac{1}{\eta} = 20\,000 \cdot \frac{0,5}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{0,95} = 1\,316 \text{ Nm} \quad (3.24)$$

Pro zjištění, zda vybraný motor bude vyhovovat aplikaci, je nutné porovnat jeho momentovou charakteristiku s charakteristikou navíjedla. Charakteristika navíjedla je složena z tahových momentů spočtených pro průměry svitku od D_{min} po D_{max} . Z Obr. 3-12 je patrné, že potřebný tahový moment navíjedla při maximálním tahu $F = 110 \text{ kN}$ je v celém rozsahu otáček, tedy pro minimální i maximální průměr svitku, menší než moment motoru. Tento motor lze použít pro pohon navíjedla.



Obr. 3-12 – Momentové charakteristiky navíjedla a motoru

Výpočet dynamického momentu, doby rozběhu a zrychlení

Dynamický moment na ose motoru se spočte podle vztahu:

$$M_D = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.25)$$

Z tohoto vzorce je potřeba určit úhlové zrychlení $\varepsilon = d\omega/dt$. Při regulaci pohonu navíjedla na konstantní žádanou hodnotu tahu v pásu je moment motoru regulován na spočtenou velikost součtu tahového a dynamického momentu. Pokud dojde k odchylce spočtené a skutečné velikosti dynamického momentu, který bývá výpočtově problematictější, přejde tato odchylka do momentu tahového. To má v lepším případě za následek nedodržení požadovaného technologického tahu v pásu, v horším případě může dojít k jeho přetržení. Čím větší část součtu tahového a dynamického momentu připadne na moment dynamický, tím větší procentuální odchylka přejde do momentu tahového. Proto je vhodné omezit poměr dynamického a tahového momentu a z něj pak spočítat mezní úhlové zrychlení motoru ε , případně zrychlení pásu a . Pro malé tahy v pásu je nutný malý dynamický moment a z toho plynoucí malé zrychlení, pro větší tahy je možné použít zrychlení vyšší. Poměr dynamického a tahového momentu se dle zkušeností volí přibližně roven 2.

1) Výpočet pro nejmenší tah $F_{\min} = 20 \text{ kN}$

Volba poměru dynamického a tahového momentu:

$$\frac{M_{D\min}}{M_{T\min}} = 2 \quad (3.26)$$

$$\frac{(J_{\text{mech}} + J_{\text{mot}}) \cdot \frac{d\omega}{dt}}{M_{T\min}} = \frac{(230 + 375) \cdot \frac{d\omega}{dt}}{1\,315,8} = 2 \quad (3.27)$$

Úhlové zrychlení:

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{\frac{M_{D\min}}{M_{T\min}} \cdot M_{T\min}}{(J_{\text{mech}} + J_{\text{mot}})} = \frac{2 \cdot 1\,315,8}{605} = 4,35 \text{ rad/s}^2 \quad (3.28)$$

Doba rozběhu:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 4,35 \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta\omega}{4,35} = \frac{52,8}{4,35} = 12 \text{ s} \quad (3.29)$$

Zrychlení stolice při rozběhu:

$$a_{\text{stol.}} = \frac{v_{\text{stol.}}}{t} = \frac{3}{12} = 0,25 \text{ m/s}^2 \quad (3.30)$$

Zrychlení navíjedla při rozběhu:

$$a_{\text{nav.}} = \frac{v_{\text{nav.}}}{t} = \frac{3,3}{12} = 0,28 \text{ m/s}^2 \quad (3.31)$$

Dynamický moment pro prázdný buben:

$$M_{Dmin} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 605 \cdot \frac{52,8}{12} = 2\,662 \text{ Nm} \quad (3.32)$$

Dynamický moment při plném svitku:

$$M_{Dmax} = (J + J_{svmax}) \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = (605 + 27) \cdot \frac{31}{12} = 1\,632,7 \text{ Nm} \quad (3.33)$$

2) Výpočet pro tah $F = 40 \text{ kN}$

$$M_{Tmin} = F \cdot \frac{D_{min}}{2} \cdot \frac{1}{i_N} \cdot \frac{1}{\eta} = 40\,000 \cdot \frac{0,5}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{0,95} = 2\,631,2 \text{ Nm} \quad (3.34)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{\frac{M_{Dmin}}{M_{Tmin}} \cdot M_{Tmin}}{(J_{mech} + J_{mot})} = \frac{2 \cdot 2\,631,2}{605} = 8,7 \text{ rad/s}^{-2} \quad (3.35)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 8,7 \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta\omega}{8,7} = \frac{52,8}{8,7} = 6 \text{ s} \quad (3.36)$$

$$a_{stol.} = \frac{v_{stol.}}{t} = \frac{3}{6} = 0,5 \text{ m/s}^2 \quad (3.37)$$

$$a_{nav.} = \frac{v_{nav.}}{t} = \frac{3,3}{6} = 0,55 \text{ m/s}^2 \quad (3.38)$$

$$M_{Dmin} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 605 \cdot \frac{52,8}{6} = 5\,324 \text{ Nm} \quad (3.39)$$

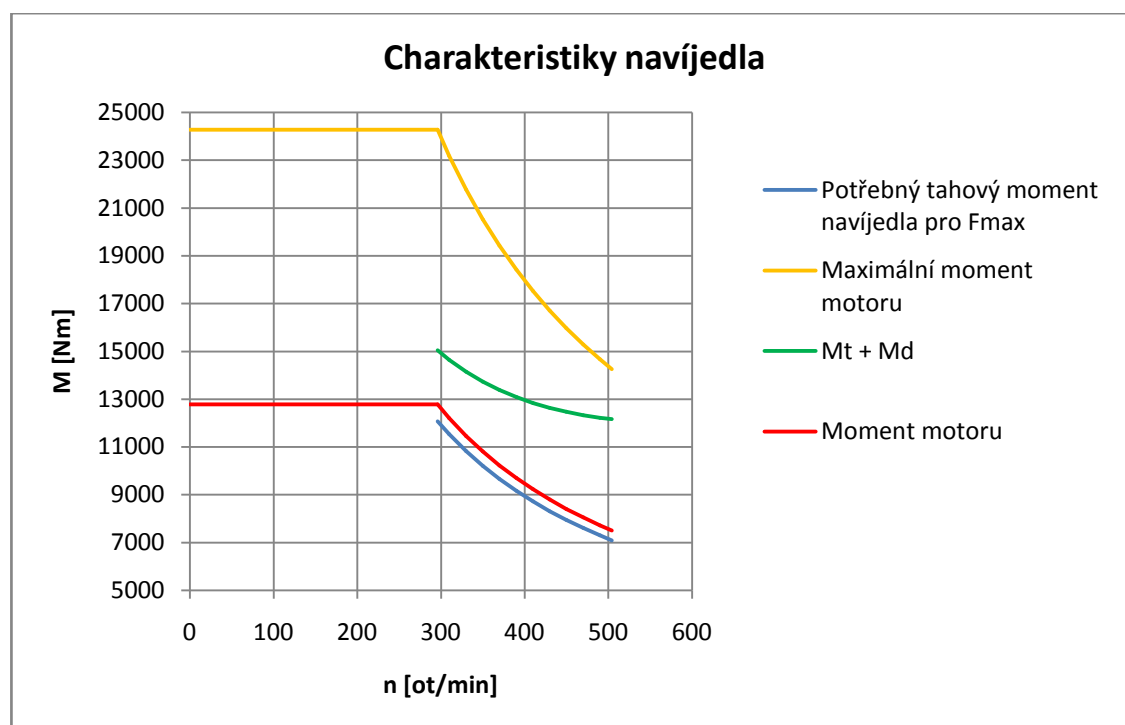
$$M_{Dmax} = (J + J_{svmax}) \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = (605 + 27) \cdot \frac{31}{6} = 3\,265,3 \text{ Nm} \quad (3.40)$$

Pro tahy nad 40 kN lze použít zrychlení stolice $0,5 \text{ m/s}^2$, pro menší tahy bude vhodné zrychlení omezit na $0,25 \text{ m/s}^2$.

Celkový moment na navíjedle

Celkový moment na navíjedle je dle vztahu (3.20) uvažován jako součet tahového a dynamického momentu. Ztrátový moment je zanedbán. Celkový moment je nutné dále porovnat pro různé průměry svitku od D_{min} do D_{max} s momentem motoru. To je provedeno na obrázku níže, viz Obr. 3-13.

Z Obr. 3-13 je patrné, že při rozběhu bude měnič zatížen dynamickým i tahovým momentem, které jsou v součtu větší než trvale dostupný moment motoru. Maximální moment motoru je však vyšší. Motor dle informací výrobce vydrží přetížení $1,9 I_N$ po dobu 15 s. Při době trvání rozběhu 12 s a přetížení zhruba $1,6 I_N$ motor vyhoví. Při chodu je již motor zatížen pouze tahovým momentem, který je menší než moment motoru. Motor tedy lze při daných podmínkách použít.



Obr. 3-13 – Momentové charakteristiky navíjeďla pro maximální tah

3.4.2 Měnič pro pohon navíjeďla

Jedná se o přímé napájení stejnosměrného motoru z tyristorového měniče. Všechny části W-L soustrojí jsou nahrazeny stejnosměrným měničem.

Z momentových charakteristik, viz Obr. 3-13, lze vyčíst, že motor navíjeďla bude při navíjení zatěžován téměř jmenovitým momentem po korekci. Měnič je tedy nutno nadimenzovat na trvalý proud odpovídající kotevnímu proudu motoru po korekci. Dále je nutné ponechat dostatečnou proudovou rezervu pro urychlování navíjeďla. V mezním případě by měl být zvolený měnič schopen napájet motor jeho maximálním redukováným proudem po dobu cca 15 s.

Dle katalogu Siemens D 23.1 2010 byl vybrán čtyřkvadrantový stejnosměrný měnič Sinamics DCM 6RA8093-4GV62-0AA0.

Parametry měniče

$U = 575 \text{ V}$	3f AC napájecí napětí kotvy
$U_N = 600 \text{ V}$	jmenovité stejnosměrné napětí měniče
$I_N = 1\,600 \text{ A}$	jmenovitý stejnosměrný proud měniče
$1,8 I_N$	proudová přetížitelnost měniče
$P = 960 \text{ kW}$	výkon měniče

$U_b = \max. 390 \text{ V}$ stejnosměrné budící napětí

$I_b = 40 \text{ A}$ stejnosměrný budící proud

3.4.3 Síťové pojistky

U čtyřkvadrantových měničů nad 900 A nejsou vyžadovány fázové a stejnosměrné pojistky. Kotevní pojistky jsou integrovány v měniči. Je tedy potřeba jen vybrat fázové pojistky pro obvod budícího vinutí.

Podle parametrů měniče ($I_d = 1\,600 \text{ A}$ a $I_b = 40 \text{ A}$) se vyberou dvě pojistky typu 3NE1802-0.

3.4.4 Měničový transformátor, komutační tlumivky

Měnič musí být vždy připojen k síťovému napájení přes komutační tlumivky. Tyto musí mít alespoň 4% u_K . Detailní postup výpočtu transformátoru je proveden v kapitole 3.3.3.

Měničový transformátor

Typový výkon transformátoru:

$$S_{TN} = \frac{S_P + S_S}{2} = K_T P_{dN} \quad (3.41)$$

Poměrný typový výkon:

$$K_T = 1,05 \quad (3.42)$$

Jmenovitý výkon odebíraný stejnosměrnou zátěží:

$$P_{dN} = U \cdot I = 500 \cdot 846 = 423 \text{ kW} \quad (3.43)$$

Potřebný typový výkon transformátoru potom vychází:

$$S_{TN} = K_T P_{dN} = 1,05 \cdot 423 = 444,15 \text{ kVA} \quad (3.44)$$

Protože na transformátor budou připojeny dva tyristorové měniče, zvolí se typový výkon dvojnásobný.

Transformátor se nechá vyrobit na zakázku. Jedná se o třífázový měničový transformátor typu Dyl o výkonu 1000 kVA. Primární vinutí je napájeno 3 kV, napětí sekundárních vinutí je 500 V.

Komutační tlumivky

Jelikož jsou na měničovém transformátoru připojeny dva tyristorové měniče, je nutné před každý z nich zařadit komutační tlumivku.

Do obvodu napájení kotvy byla zvolena podle redukovaného proudu motoru $I = 846 \text{ A}$ třífázová komutační tlumivka Siemens 4EU39 21-7BA00-0A, jejíž proud $I_{dN} = 980 \text{ A}$. Trvalý povolený střídavý proud tlumivkou je $I_{thmax} = 800 \text{ A}$, což vyhovuje proudu před měničem $0,818 \cdot 846 = 692 \text{ A}$. Pro vyšší proudy při dynamických stavech pohonu je zde dostatečná rezerva. Tlumivka je pro napětí 500 V , 50 Hz .

Komutační tlumivku je nutné zařadit také do obvodu napájení buzení. V tomto případě se jedná o 1f tlumivku pro napájení 400 V a 50 Hz . Podle jmenovitého proudu buzení $I_b = 30 \text{ A}$ byla vybrána tlumivka Siemens 4EM61 00-3CB00, jejíž proud $I_{thmax} = 31,5 \text{ A}$ a $I_{dN} = 39 \text{ A}$.

3.4.5 Vyhlazovací tlumivky

Vyhlazovací tlumivky spolehlivě snižují zvlnění proudu v obvodu motoru, výrazně omezují síťové harmonické a tím zlepšují podmínky výkonového zdroje. Odvození výpočtu velikosti tlumivky je provedeno dle [8].

Indukčnost vyhlazovací tlumivky L_v :

$$L_v = L_c - L_k \quad (3.45)$$

kde L_a je indukčnost kotvy motoru a L_c celková indukčnost obvodu za měničem:

$$L_c = \frac{\sqrt{U_\sigma^2 - R^2 I_\sigma^2}}{\omega_{\sigma(1)} I_\sigma} \quad (3.46)$$

Kvadrát efektivní hodnoty střídavé složky usměrněného napětí:

$$U_\sigma^2 = U_m^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{p}{4\pi} \cos(2\alpha) \sin \frac{2\pi}{p} - \left(\frac{p}{\pi} \cos\alpha \sin \frac{\pi}{p} \right)^2 \right] \quad (3.47)$$

Celkový odpor kotvy při 80°C :

$$R_k = 20,1 \text{ m}\Omega \quad (3.48)$$

Efektivní hodnota střídavé složky usměrněného proudu:

$$I_\sigma = \sigma_{el} \cdot I_d \quad (3.49)$$

Úhlový kmitočet 1. harmonické střídavé složky usměrněného napětí:

$$\omega_{\sigma(1)} = p \cdot \omega = 6 \cdot 2\pi \cdot 50 = 1884 \text{ rad/s} \quad (3.50)$$

Úbytek napětí na komutační tlumivce pro každou fázi:

$$\Delta u_K = 4\% \quad (3.51)$$

Maximální hodnota sdruženého napětí na svorkách měniče:

$$U_m = 0,96 \cdot \sqrt{2} \cdot U_s = 0,96 \cdot \sqrt{2} \cdot 500 = 678,8 \text{ V} \quad (3.52)$$

Nejnepříznivější úhel řízení usměrňovače:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad (3.53)$$

Požadovaná hodnota proudového zvlnění:

$$\sigma_{el} = 4\% \quad (3.54)$$

Střední hodnota usměrněného proudu (dosazena redukováná jmenovitá hodnota proudu motoru):

$$I_d = 846 \text{ A} \quad (3.55)$$

Indukčnost vyhlazovací tlumivky:

$$L_v = 2,23 \text{ mH} \quad (3.56)$$

Vyhlazovací tlumivka se musí dimenzovat na maximální proud motoru, v našem případě na:

$$I_{thmax} = 1\,620 \text{ A} \quad (3.57)$$

Zvolená tlumivka se nechá vyrobit na zakázku. Musí být dimenzována na jmenovitý proud motoru 846 A. Maximální proud tlumivkou by měl odpovídat maximálnímu proudu motoru, tedy 1 620 A. Napětí tlumivky je shodné s napětím motoru 500 V.

3.4.6 Řízení a ovládání měniče

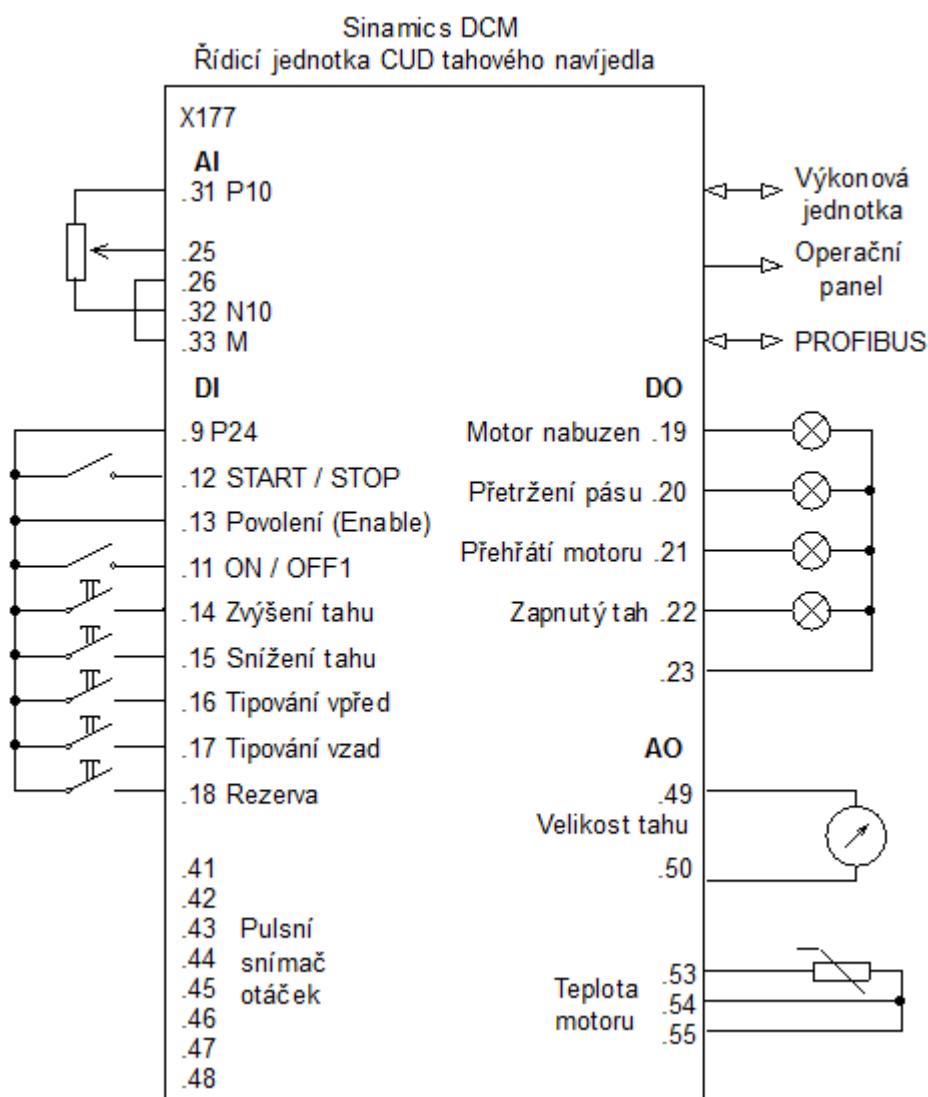
Řízení měniče je zajištěno řídicí jednotkou CUD. Výkonová část měniče se skládá z reverzního usměrňovače, ze kterého je napájena kotva motoru, a z jednoduchého usměrňovače určeného pro napájení buzení motoru. Na vstup měniče se přivádí třífázové napájecí napětí, které je usměrněno v usměrňovači.

Měnič pro pohon tahového navíjeda sestává z výkonového modulu řízeného samostatnou řídicí jednotkou, která komunikuje s řídicími jednotkami válcovací stolice pomocí rozhraní Profibus.

Mezi řídicími jednotkami jsou především přenášeny signály o zapnutí/vypnutí měničů, blokování měničů a start/stop motoru, dále signály o rychlosti a směru válcování a navíjení, zrychlení pohonu a chybová hlášení.

Řídicí jednotka CUD

Řídicí jednotka CUD včetně zapojení analogových a digitálních vstupů a výstupů je zobrazena na Obr. 3-14. Obsahuje konektor pro připojení k výkonovému modulu, rozhraní Profibus a rozhraní pro připojení ovládacího panelu. Řídicí jednotka umí vyhodnocovat signály z inkrementálního snímače otáček (svorky 41 - 48). Svorky 53 - 55 slouží k připojení senzoru teploty motoru.



Obr. 3-14 – Řídicí jednotka CUD tahového navíjeďla

Svorkovnice X177 obsahuje 4 nastavitelné digitální vstupy, 4 nastavitelné obousměrné digitální vstupy/výstupy a 4 nastavitelné digitální výstupy. K této svorkovnici se připojí tlačítko START/STOP pro zapnutí/vypnutí pomocného napájení měniče, tlačítko ON/OFF1 pro zapnutí/vypnutí motoru (navíjení) a nouzové zastavení OFF3. Další digitální vstupy slouží k zadávání požadované velikosti tahu a režimu tipování (manipulační rychlosti). Režim tipování (pevně nastavená pomalá manipulační rychlost) bývá využíván zejména pro nastavení navíjedla při zavádění válcovaného materiálu do štěrbiny.

Požadovaná rychlost navíjení je dána rychlostí válcování. Její velikost je oproti rychlosti válcovací stolice zvýšená o určitou korekci, která je závislá na poměrech v mezeři mezi pracovními válci stolice (rozdílu vstupní a výstupní tloušťky válcovaného pásu, materiálu pásu, atd.). Signál velikosti rychlosti je nutné přenést pomocí rozhraní PROFIBUS.

Digitální výstupy slouží k indikování stavu řídicí jednotky pomocí světelných signálů. Signalizovány jsou následující stavy: motor nabuzen, přetržení pásu, přehřátí motoru a zapnutí tahu.

Výkonový modul je stejný jako u pohonu válcovací stolice, viz Obr. 3-10.

3.5 Regulační soustava pohonu válcovací stolice

Hlavní pohon tratě je v provedení s pohonem obou válců stolice jedním společným motorem přes rozvodovku. Poháněcí motor má kotevní i budící obvod napájen z tyristorových měničů.

Regulace otáček je prováděna do jmenovitých otáček motoru napětím kotvy, pro vyšší rychlost je možné využít odbuzování motoru.

Regulační schéma válcovací stolice je na Obr. 3-15. Na začátku se nastaví požadovaná rychlostní úroveň válcování v^* . Tuto rychlost lze rovněž zvyšovat nebo snižovat příslušnými tlačítky i během válcování.

Následuje omezovač strmosti nárůstu rychlosti s lineárním nárůstem zrychlení (rozběhová rampa).

Tento blok má dva výstupy. Prvním výstupem je žádaná hodnota rychlosti ω^* , která je přivedena na vstup regulátoru rychlosti.

Druhým výstupem je derivace žádané rychlosti, tj. zrychlení a_t . Signál zrychlení je převeden na pravou a levou stranu stolice na základě poměru tloušťek pásu a směru válcování. Tyto výstupní signály jsou označeny a_1 a a_2 a jsou zavedeny do pohonů navíjedel za účelem provedení dynamické kompenzace.

Skutečná rychlost motoru stolice snímaná inkrementálním čidlem je využita u regulace tloušťky pásu. Tato rychlost definuje rychlost válcování v . Zároveň to je referenční rychlost pro stanovení rychlosti navíjedel.

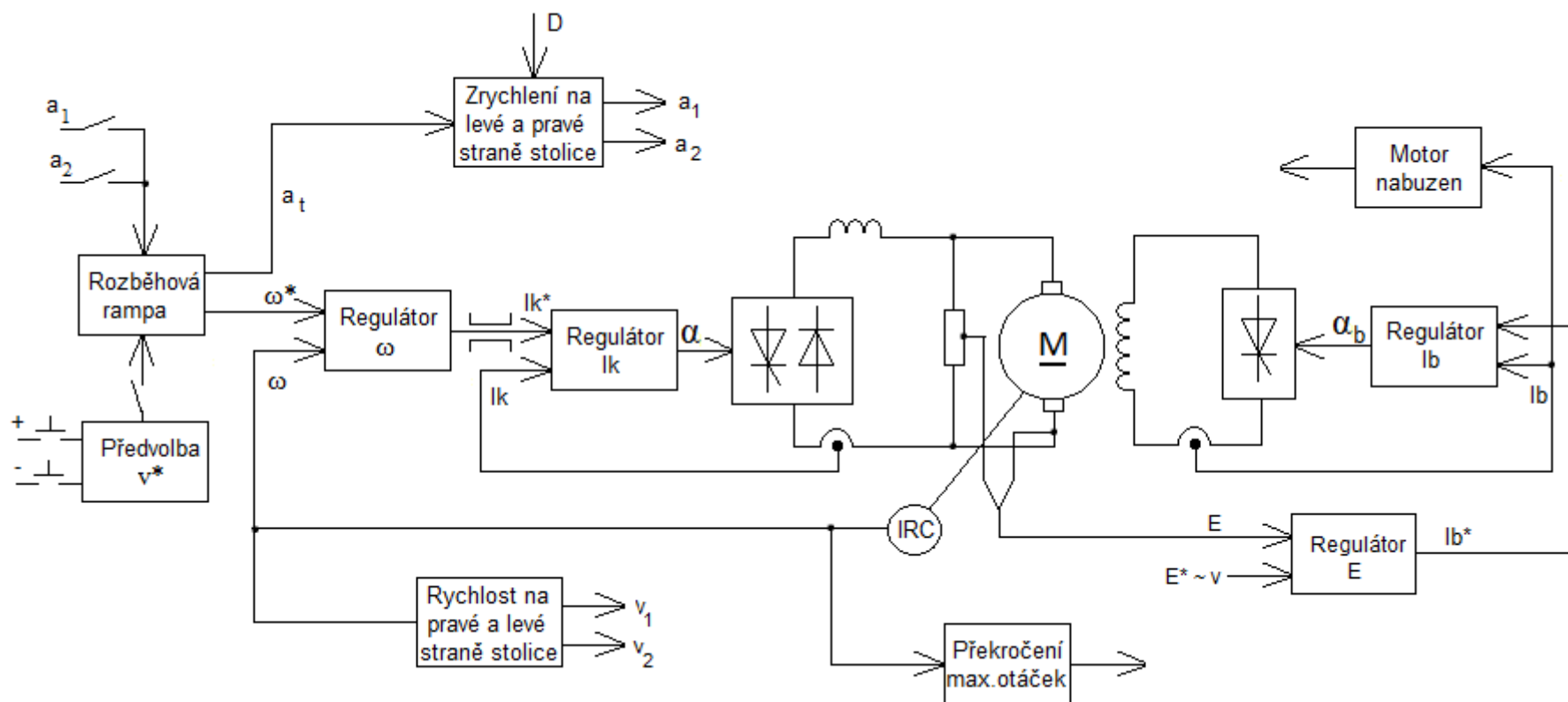
Pro účely vyhodnocení přetržení pásu v pohonech navíjedel je rychlost stolice převedena na pravou a levou stranu stolice na základě poměru tloušťek pásu a směru válcování. Tyto výstupní signály jsou označeny v_1 a v_2 .

Logické vstupy:

- zvyšování a snižování úrovně rychlosti
- nastavení úrovně zrychlení
- povel pro start/stop
- rychlé zastavení

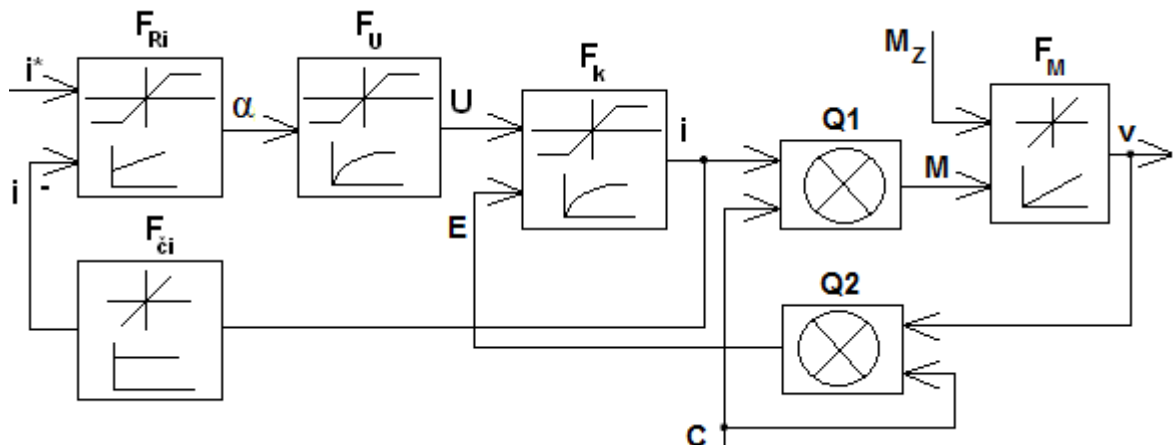
Logické výstupy:

- motor nabuzen
- překročení max. otáček motoru
- řídicí systém pohonu stolice je v pořádku



Obr. 3-15 – Regulační struktura pohonu válcovací stolice

3.5.1 Regulační obvod kotevního proudu



Obr. 3-16 – Regulační struktura smyčky kotevního proudu

Regulátor kotevního proudu

$$F_{Ri} = K_{Ri} \cdot \frac{1 + p\tau_{Ri}}{p\tau_{Ri}} \quad (3.58)$$

Tyristorový měnič

$$F_U = K_U \cdot \frac{1}{1 + p\tau_U} \quad (3.59)$$

Obvod kotvy motoru

$$F_k = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_k} \quad (3.60)$$

Čidlo proudu

$$F_{ci} = K_{ci} \quad (3.61)$$

Vliv řízeného buzení (blok násobení):

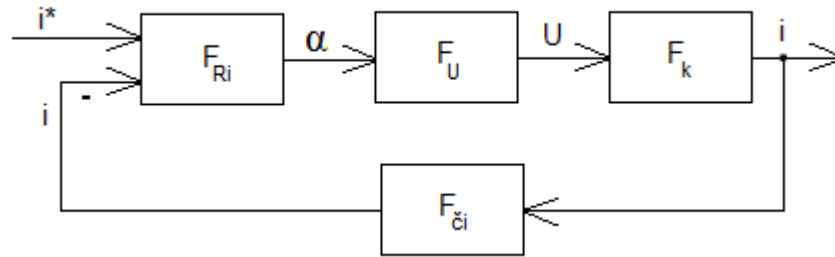
$$M = I \cdot k\phi \quad (3.62)$$

$$E = v \cdot k\phi \quad (3.63)$$

Setrvačnost motoru

$$F_M = \frac{1}{J \cdot p} \quad (3.64)$$

Pro výpočet regulačního obvodu kotevního proudu budeme uvažovat zjednodušené schéma, které platí pro zabrzděný motor.



Obr. 3-17 – Regulační struktura obvodu kotevního proudu pro zabrzděný motor

Měnič

Zesílení:

$$K_U = \frac{U_M}{10} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{mot}}{10} = \frac{4}{3} \cdot \frac{650}{10} = 87 \quad (3.65)$$

Dopravní zpoždění:

$$\tau_U = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{6 \cdot 50} = 1,67 \text{ ms} \quad (3.66)$$

Motor

$$\tau_k = \frac{L_k}{R_k} = 0,057 \text{ s} \quad (3.67)$$

$$K_{ci} = 1 \quad (3.68)$$

Návrh regulátoru proudu z frekvenčních charakteristik

Pro frekvenční přenos měniče F_U a kotvy motoru F_k se sestrojí amplitudová a fázová frekvenční charakteristika – viz Příloha 4.

Pro úhel bezpečnosti $\varphi_b = 75^\circ$ odečteme úhlovou frekvenci $\omega_r = 217 \text{ rad/s} = 10^{2,34}$, což odpovídá zesílení $A = 61,9 \text{ dB}$. Je potřeba posunout amplitudovou charakteristiku o 61,9 dB dolů. Zesílení regulátoru proudu tedy bude:

$$-61,9 = 20 \cdot \log K_{Ri} \quad (3.69)$$

$$K_{Ri} = 10^{-3,1} = 0,0008 \quad (3.70)$$

Časová konstanta se volí o jednu dekádu vlevo od frekvence řezu $\omega_r = 10^{2,34}$:

$$\tau_{Ri} = \frac{10}{\omega_r} = 10^{-1,34} = 0,046 \text{ s} \quad (3.71)$$

Návrh regulátoru výpočtem

Zesílení regulátoru proudu:

$$K_{Ri} = \frac{\tau_k}{2 \cdot K_U \cdot \frac{1}{R} \cdot K_{\dot{i}_i} \cdot \tau_U} = \frac{0,058}{2 \cdot 87 \cdot \frac{1}{0,00517} \cdot 1 \cdot 0,00167} = 0,001 \quad (3.72)$$

Časová konstanta regulátoru proudu dle symetrického optima:

$$\tau_{Ri} = 4 \cdot \tau_U = 4 \cdot 0,00167 = 0,00668 \text{ s} \quad (3.73)$$

Pro lepší odezvu se někdy zařazuje před regulátor proudu navržený dle symetrického optima ještě RC filtr:

$$F_{Fi} = \frac{1}{p \tau_{Ri} + 1} = \frac{1}{p \cdot 4\tau_U + 1} = \frac{1}{p \cdot 0,00668 + 1} \quad (3.74)$$

Model byl simulován v prostředí Simulink. Na modelu byla vyzkoušena odezva na skokové zadání i_k^* a požadavek na zastavení motoru v čase. Graf na Obr. 3-18 znázorňuje odezvu na skokové zadání i_k^* při nastavení regulátoru dle frekvenčních charakteristik a dle symetrického optima se zařazeným RC filtrem.

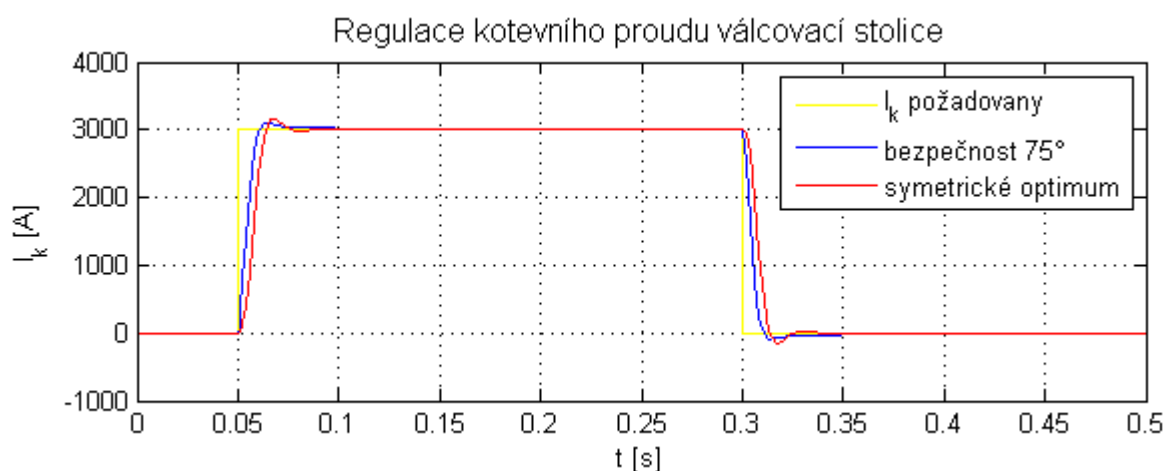
Přenos otevřené regulační smyčky proudu:

$$F_{io} = F_{Ri} \cdot F_U \cdot F_k \quad (3.75)$$

Přenos uzavřené regulační smyčky proudu:

$$F_{iu} = \frac{F_{io}}{F_{io} + 1} \quad (3.76)$$

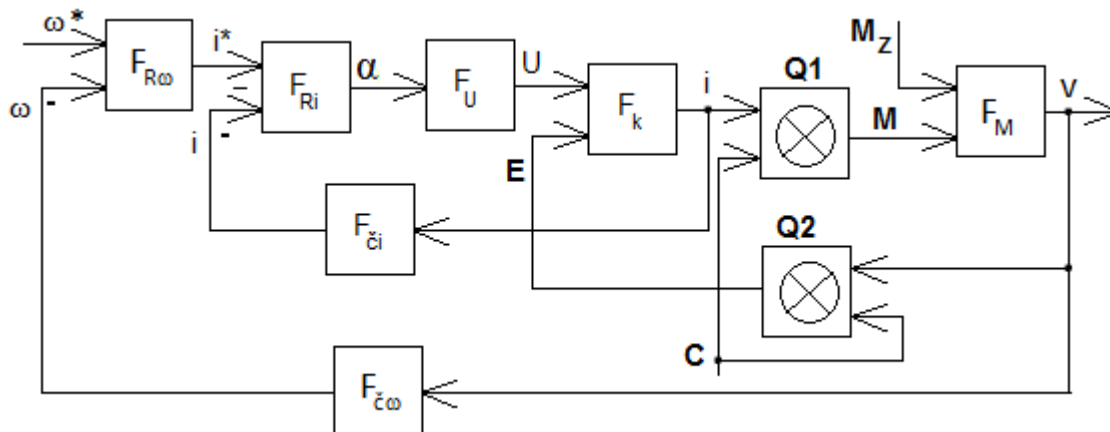
Celkový přenos v otevřené a uzavřené proudové smyčce je zobrazen v příloze, viz Příloha 5.



Obr. 3-18 – Porovnání variant návrhu regulátoru proudu dle frekvenčních charakteristik s bezpečností ve fázi 75° a dle symetrického optima se zařazeným RC filtrem

Z uvedených grafů lze konstatovat, že obě varianty navrženého řešení proudové regulační smyčky z hlediska stability vyhovují. Jelikož má regulace proudu sloužit k omezení proudu, je vyžadována rychlá reakce na poruchu, např. přetížení. Nárazy zátěže musí být co nejrychleji vyregulovány. Zařazený filtr v regulační smyčce může způsobovat horší dynamickou odezvu, je tedy vhodnější použít variantu návrhu dle frekvenčních charakteristik, z nichž nejlepší odezva vychází pro bezpečnost ve fázi 75°.

3.5.2 Regulační obvod rychlosti



Obr. 3-19 – Regulační struktura obvodu rychlosti

Regulátor rychlosti:

$$F_{R\omega} = K_{R\omega} \cdot \frac{1 + p\tau_{R\omega}}{p\tau_{R\omega}} \quad (3.77)$$

Čidlo rychlosti:

$$F_{c\omega} = 1 \quad (3.78)$$

Setrvačnost motoru:

$$F_M = \frac{1}{Jp} \quad (3.79)$$

Moment setrvačnosti motoru a stolice:

$$J = J_{mot.} + J_{stol.} = 9110 + 950 = 10\,060 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.80)$$

Konstanta nabuzení

1) Jmenovité nabuzení: $n = 175 \text{ ot/min}$

$$k\Phi_N = \frac{E_0}{\omega} = \frac{588}{\frac{175 \cdot \pi}{30}} = 32,1 \quad (3.81)$$

2) Odbuzený motor: $n = 350$ ot/min

$$k\Phi_0 = \frac{E_0}{\omega} = \frac{588}{\frac{350 \cdot \pi}{30}} = 16,04 \quad (3.82)$$

Parametry regulátoru rychlosti se určí z frekvenční charakteristiky otevřené rychlostní smyčky (viz Příloha 6), jejíž přenos je:

$$F_\omega = F_{io} \cdot k\Phi \cdot F_M \quad (3.83)$$

Pro úhel bezpečnosti $\varphi_b = 75^\circ$ se odečte úhlová frekvence $\omega_r = 59,8$ rad/s = $10^{1,78}$, což odpovídá amplitudě $A = -83,6$ dB (viz Příloha 6). Je potřeba posunout amplitudovou charakteristiku o 83,6 dB nahoru. Zesílení regulátoru rychlosti tedy bude:

$$83,6 = 20 \cdot \log K_{Ri} \quad (3.84)$$

$$K_{R\omega} = 10^{4,18} = 15\,135,6 \quad (3.85)$$

Časová konstanta regulátoru rychlosti:

$$\tau_{R\omega} = 10^{1,78} = 60,3 \text{ s} \quad (3.86)$$

Přenos regulátoru rychlosti – typ PI:

$$F_{R\omega} = K_{R\omega} \cdot \frac{1 + p\tau_{R\omega}}{p\tau_{R\omega}} = 15\,135,6 \cdot \frac{1 + p\,60,3}{p\,60,3} \quad (3.87)$$

Přenos otevřené rychlostní smyčky:

$$F_{\omega o} = F_{R\omega} \cdot F_{io} \cdot k\Phi \cdot F_M \quad (3.88)$$

Přenos uzavřené rychlostní smyčky:

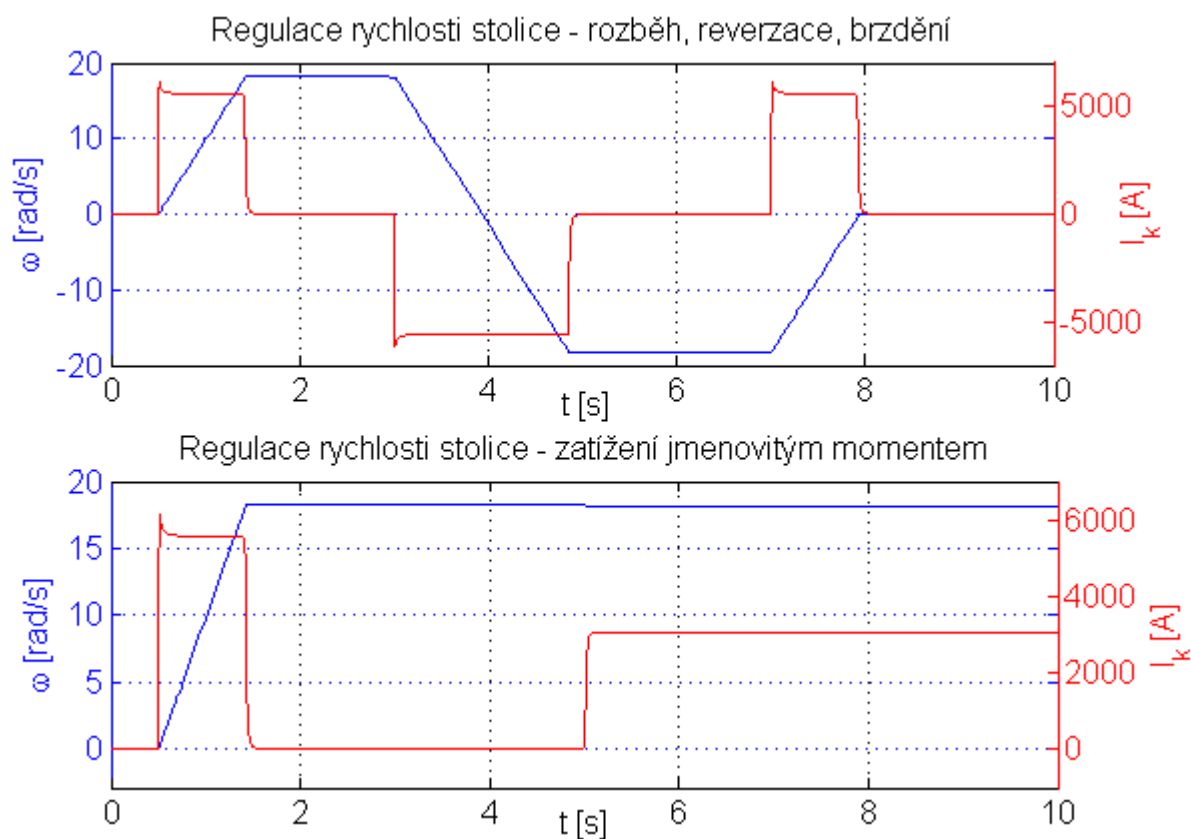
$$F_{\omega u} = \frac{F_{\omega o}}{F_{\omega o} + 1} \quad (3.89)$$

Výsledný přenos v otevřené a uzavřené smyčce je zobrazen v příloze (viz Příloha 7).

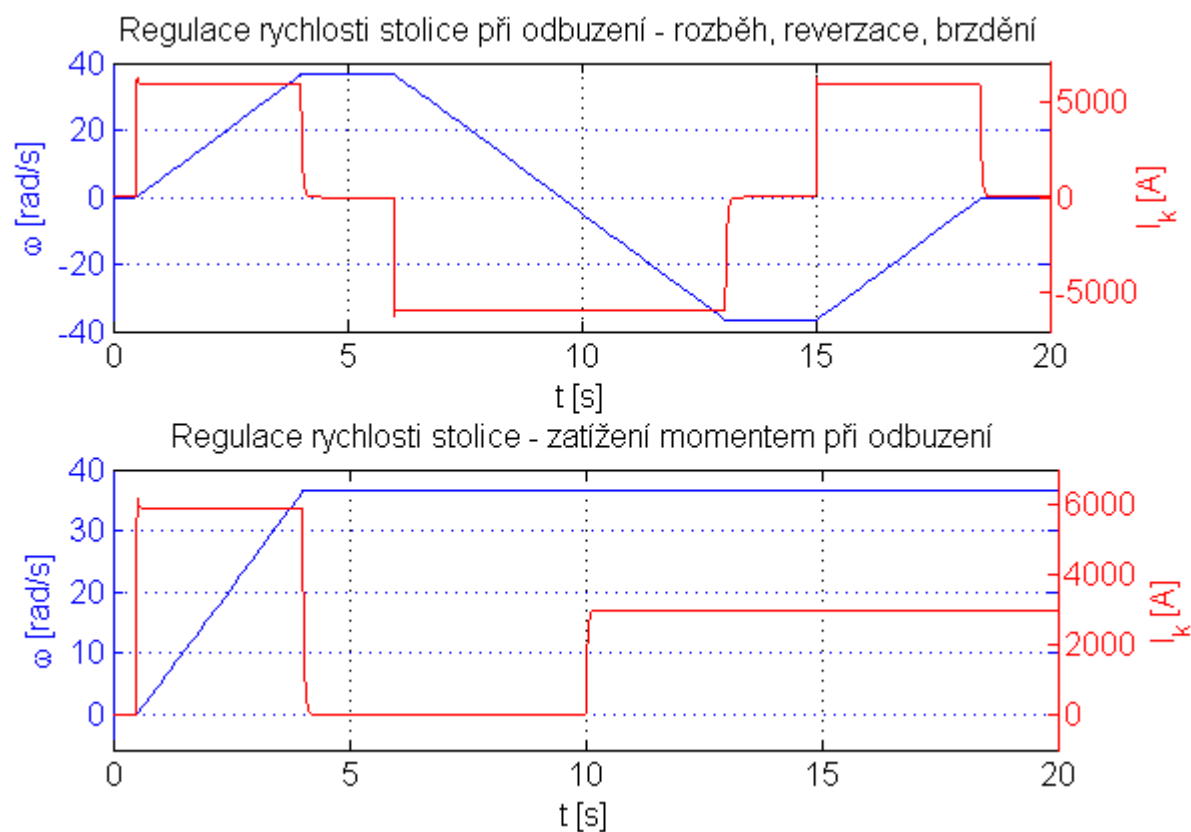
Na modelu se odzkoušela odezva na skokové zadání $\omega_N^* = 18,3$ rad/s při jmenovitém nabuzení motoru, tj. $k\Phi_N = 32,1$. Byl vyzkoušen rozběh, reverzace a brzdění, viz Obr. 3-20.

Dále byla vyzkoušena odezva na skokové zatížení pohonu jmenovitým momentem $M_Z = 98,2$ kN.

Na Obr. 3-21 jsou znázorněny stejné průběhy pro trvale odbuzený motor, tj. $k\Phi = 16,04$. Zátěžný moment je v tomto případě $M_Z = 48,1$ kN a otáčky $\omega^* = 36,6$ rad/s.

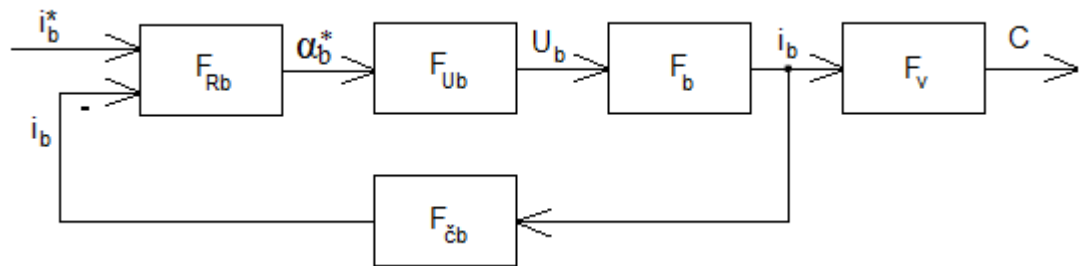


Obr. 3-20 – Průběhy rychlosti a proudu při požadavku na jmenovité otáčky, reverzaci, brzdění a zatížení jmenovitým momentem při jmenovitém nabuzení



Obr. 3-21 – Průběhy rychlosti a proudu při požadavku na jmenovité otáčky, reverzaci, brzdění a zatížení momentem při odbuzení

3.5.3 Regulace obvodu buzení



Obr. 3-22 – Regulační struktura obvodu budícího proudu

Regulační smyčka buzení sestává z budícího vinutí napájeného z tyristorového měniče, jehož výstupem je budící napětí, které při daném odporu budícího vinutí zajišťuje průchod potřebného budícího proudu vinutím.

Skutečná hodnota budícího proudu je snímána čidlem a je porovnávána v regulátoru budícího proudu se žádanou hodnotou. Výstupem regulátoru je žádaná hodnota řídicího úhlu α_b^* tyristorového měniče buzení.

Regulátor budícího proudu:

$$F_{Rb} = K_{Rb} \cdot \frac{1 + p\tau_{Rb}}{p\tau_{Rb}} \quad (3.90)$$

Tyristorový měnič buzení:

$$F_{Ub} = \frac{K_{Ub}}{1 + p\tau_U} \quad (3.91)$$

Budící obvod motoru:

$$F_b = K_b \cdot \frac{1 + p\tau_v}{1 + p(\tau_b + \tau_v)} \quad (3.92)$$

Čidlo proudu:

$$F_{cb} = K_{cb} \quad (3.93)$$

Tlumení vířivými proudy motoru:

$$F_v = \frac{K_v}{1 + p\tau_v} \quad (3.94)$$

Budící vinutí

Budící vinutí se vyznačuje dlouhou časovou konstantou τ_b , která se mění nasycováním magnetického obvodu dynamu. V přechodových stavech se dále uplatňuje vliv vířivých proudů, respektovaný časovou konstantou τ_v .

Časové konstanty budícího vinutí:

$$\tau_b = 4,89 \text{ s} \quad (3.95)$$

$$\tau_v = 0,05 \tau_b = 0,05 \cdot 4,89 = 0,02445 \text{ s} \quad (3.96)$$

Zesílení budícího vinutí:

$$K_b = \frac{1}{R_b} = \frac{1}{11,6} = 0,0862 \text{ A/V} \quad (3.97)$$

Přenos budícího vinutí:

$$\begin{aligned} F_b(p) &= K_b \cdot \frac{1 + p \tau_v}{1 + p (\tau_b + \tau_v)} = \\ &= \frac{K_b}{1 + p (\tau_b + \tau_v)} + \frac{K_b \cdot p \tau_v}{1 + p (\tau_b + \tau_v)} = \\ &= \frac{0,0862}{1 + p (4,89 + 0,02445)} + \frac{0,0862 \cdot p \cdot 4,89}{1 + p (4,89 + 0,02445)} \end{aligned} \quad (3.98)$$

Tlumící obvod:

$$K_V = \frac{k\phi_N}{I_{bN}} = \frac{32,1}{18,5} = 1,735 \quad (3.99)$$

Tyristorový měnič

Tyristorový měnič se vyznačuje velmi krátkou časovou konstantou, která při frekvenci sítě 50 Hz činí:

$$\tau_U = \frac{1}{2 \cdot 50} = 0,01 \text{ s} \quad (3.100)$$

Zesílení tyristorového měniče buzení:

$$K_{Ub} = \frac{U_{bmax}}{10} = \frac{390}{10} = 39 \quad (3.101)$$

Přenos tyristorového měniče buzení:

$$F_{Ub} = \frac{K_{Ub}}{1 + p\tau_U} = \frac{39}{1 + p \cdot 0,01} \quad (3.102)$$

Zesílení čidla budícího proudu:

$$K_{\check{c}b} = 1 \quad (3.103)$$

Regulátor budícího proudu motoru

Regulační obvod se optimalizuje při zanedbání vířivých proudů $\tau_v = 0$. Obsahuje totiž jednu velkou časovou konstantu τ_b a malé časové konstanty, přičemž platí, že velká časová konstanta τ_b je podstatně větší než časové konstanty malé. Použije se proporcionálně-integrační typ regulátoru.

Ze zkušenosti se volí následující hodnoty zesílení a časové konstanty:

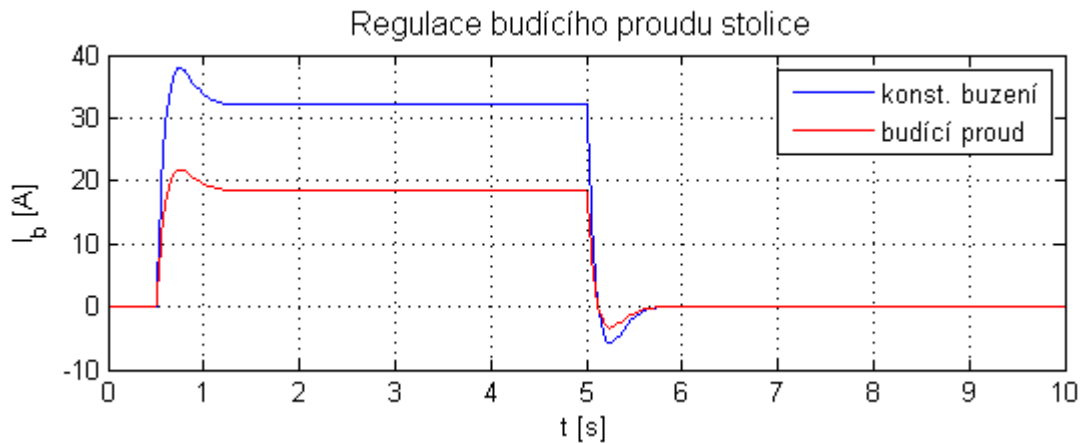
$$K_{Rb} = 20 \quad (3.104)$$

$$\tau_{Rb} = 100 \text{ ms} \quad (3.105)$$

Přenos regulátoru budicího proudu (typ PI):

$$F_{Rb}(p) = K_{Rb} \cdot \frac{1 + p\tau_{Rb}}{p\tau_{Rb}} = 10 \cdot \frac{1 + 0,1 p}{0,1 p} \quad (3.106)$$

Dynamické chování regulační smyčky buzení je analyzováno na základě jednotkového skoku žádané hodnoty budicího proudu.



Obr. 3-23 – Odezvy budicího proudu a konstanty nabuzení při požadavku na jmenovité nabuzení

3.5.4 Regulace indukovaného napětí

Regulátor indukovaného napětí:

$$F_{Re}(p) = K_{Re} \cdot \frac{1 + p\tau_{Re}}{p\tau_{Re}} \quad (3.107)$$

Zesílení regulátoru indukovaného napětí:

$$K_{Re} = \frac{\tau_v}{2 \cdot K_v \cdot 2 \tau_U} = \frac{0,02445}{2 \cdot 0,735 \cdot 2 \cdot 0,00167} = 2,1 \quad (3.108)$$

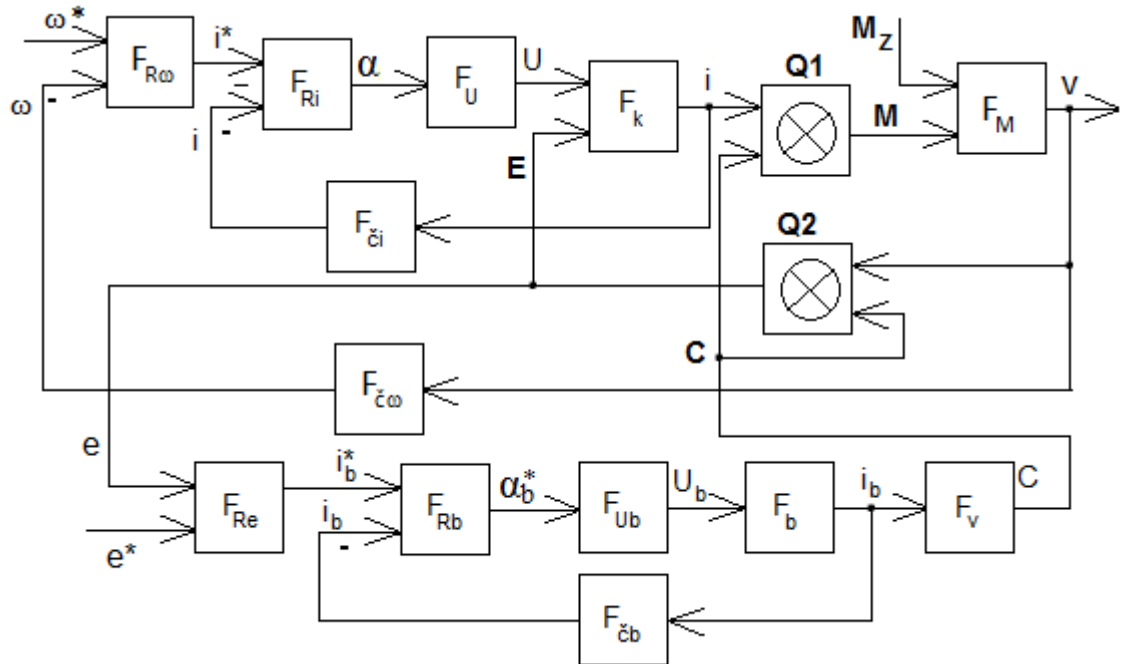
Časová konstanta regulátoru indukovaného napětí:

$$\tau_{Re} = 4 \cdot 2 \tau_U = 4 \cdot 2 \cdot 0,00167 = 0,01336 \text{ s} \quad (3.109)$$

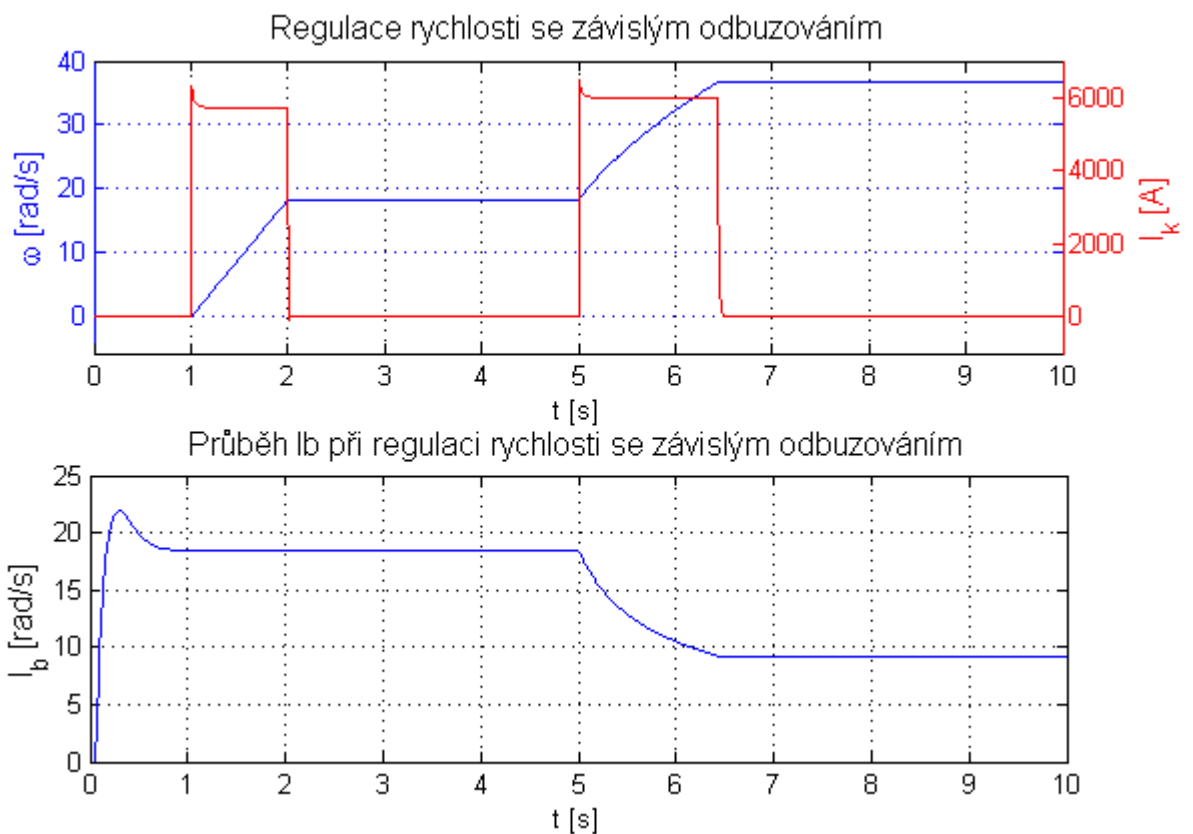
Přenos regulátoru indukovaného napětí:

$$F_{Re} = K_{Re} \cdot \frac{1 + p\tau_{Re}}{p\tau_{Re}} = 2,1 \frac{1 + p \cdot 0,01336}{p \cdot 0,01336} \quad (3.110)$$

3.5.5 Simulace celého pohonu včetně závislého odbuzování



Obr. 3-24 – Regulační struktura pohonu válcovací stolice se závislým odbuzováním



Obr. 3-25 – Odezvy rychlosti, kotevního a buďícího proudu při požadavku na jmenovité a maximální otáčky při závislém odbuzování

3.6 Regulační soustava pohonu navíjedla

3.6.1 Simulace navíjedla s regulací tahu

Schéma regulace tahového navíjedla je na Obr. 3-26. Na začátku se nastaví požadovaná hodnota tahu F^* . Z této hodnoty se vypočítá žádaná hodnota tahového momentu v závislosti na aktuální hodnotě průměru svitku D_s .

Celková žádaná hodnota momentu motoru je vypočítána jako součet tahového momentu M_T , urychlujícího momentu M_D , ztrátového a případně i ohybového momentu $M_{ztrát}$.

Žádaná hodnota kotevního proudu motoru je vytvořena na základě aktuální hodnoty nabuzení motoru. Požadovaný tah je udržován pomocí regulační smyčky proudu. Před regulátor proudu je zařazen korekční člen, jehož úkolem je udržet požadovaný tah během přechodových dějů.

Rychlostní zpětná vazba je z impulsního čidla otáček. Smyčka kotevního proudu motoru má zpětnou vazbu z čidla stejnosměrného proudu hlavního obvodu.

Budící konstanta motoru je vytvořena v bloku reprezentujícím magnetizační charakteristiku motoru.

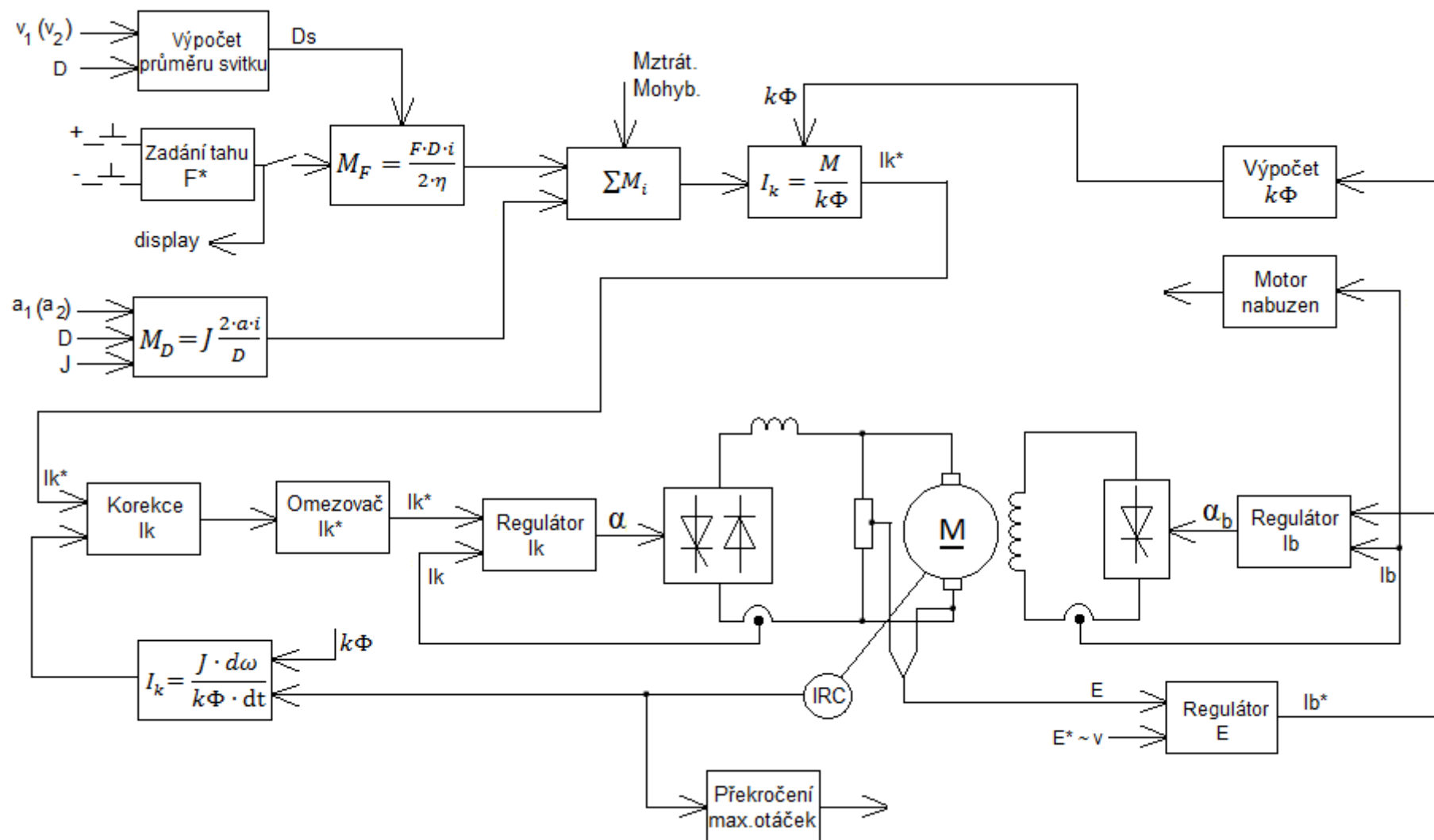
Velikost rychlosti a zrychlení levého a pravého navíjedla je zadávána z řídicího systému válcovací stolice

Logické vstupy:

- zadání velikosti tahu
- zadávání manipulační rychlosti

Logické výstupy:

- motor nabuzen
- překročení max. otáček motoru
- řídicí systém pohonu navíjedla je v pořádku
- přetržení pásu



Obr. 3-26 – Regulační struktura regulace tahového navíjeďla

3.6.2 Regulační obvod kotevního proudu

Blokové schéma regulačního obvodu kotevního proudu motoru pro pohon navíjedla je stejné jako pro pohon stolice, viz Obr. 3-16.

Měnič

Zesílení:

$$K_U = \frac{U_M}{10} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{mot}}{10} = \frac{4}{3} \cdot \frac{500}{10} = 66,7 \quad (3.111)$$

Dopravní zpoždění:

$$\tau_U = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{6 \cdot 50} = 1,67 \text{ ms} \quad (3.112)$$

Motor

$$\tau_k = \frac{L_k}{R_k} = 35 \text{ ms} \quad (3.113)$$

$$K_{\check{c}i} = 1 \quad (3.114)$$

Návrh regulátoru proudu z frekvenčních charakteristik

Pro frekvenční přenos měniče F_u a kotvy motoru F_k se sestrojí amplitudová a fázová frekvenční charakteristika – viz Příloha 8.

Pro úhel bezpečnosti $\varphi_b = 70^\circ$ odečteme úhlovou frekvenci $\omega_{r1} = 287 \text{ rad/s} = 10^{2,46}$, což odpovídá zesílení $A = 49,4 \text{ dB}$. Je potřeba posunout amplitudovou charakteristiku o 49,4 dB dolů. Zesílení regulátoru proudu tedy bude:

$$-49,4 = 20 \cdot \log K_{Ri} \quad (3.115)$$

$$K_{Ri} = 10^{-2,47} = 0,0034 \quad (3.116)$$

Časovou konstantu volíme o jednu dekádu vlevo od frekvence řezu $\omega_{r1} = 10^{2,46}$:

$$\tau_{Ri} = \frac{10}{\omega_{r1}} = 10^{-1,46} = 0,035 \text{ s} \quad (3.117)$$

Pro úhel bezpečnosti $\varphi_b = 80^\circ$ odečteme úhlovou frekvenci $\omega_{r2} = 198 \text{ rad/s} = 10^{2,3}$, což odpovídá zesílení $A = 53,1 \text{ dB}$. Je potřeba posunout amplitudovou charakteristiku o 53,1 dB dolů. Zesílení regulátoru proudu tedy bude:

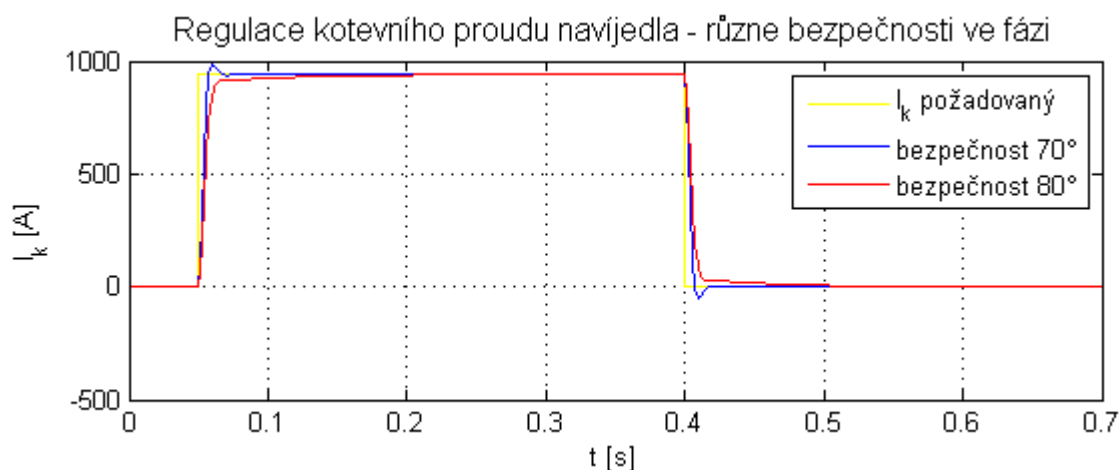
$$-53,1 = 20 \cdot \log K_{Ri} \quad (3.118)$$

$$K_{Ri} = 10^{-2,655} = 0,0022 \quad (3.119)$$

Časovou konstantu volíme o jednu dekádu vlevo od frekvence řezu $\omega_{r2} = 10^{2,3}$:

$$\tau_{Ri} = \frac{10}{\omega_{r2}} = 10^{-1,3} = 0,05 \text{ s} \quad (3.120)$$

Na modelu byla opět vyzkoušena odezva na skokové zadání $i_k^* = 940 \text{ A}$. Graf na Obr. 3-27 znázorňuje odezvu na skokové zadání i_k^* při nastavení regulátoru pro úhly bezpečnosti 70° a 80° . Dále byla zkoumána odezva na požadavek na zastavení motoru.



Obr. 3-27 - Odezvy regulátoru proudu na skokové zadání i_k^* při nastavení regulátoru dle frekvenčních charakteristik pro úhly bezpečnosti 70° a 80°

Z Obr. 3-27 je zřejmé, že lepší odezvu má regulátor nastavený podle úhlu bezpečnosti 70° .

3.6.3 Regulační obvod rychlosti

Struktura regulačního obvodu rychlosti je opět stejná jako při regulaci pohonu stolice, viz Obr. 3-19.

Moment setrvačnosti motoru a navíjedla

$$J = J_{mot.} + J_{nav.} = 375 + 257 = 632 \quad (3.121)$$

Konstanta nabuzení

1) Jmenovité nabuzení: $n = 300 \text{ ot/min}$

$$k\Phi_N = \frac{E_0}{\omega} = \frac{480}{\frac{300 \cdot \pi}{30}} = 15,28 \quad (3.122)$$

2) Odbuzený motor: $n = 600$ ot/min

$$k\Phi_0 = \frac{E_0}{\omega} = \frac{480}{\frac{600 \cdot \pi}{30}} = 7,64 \quad (3.123)$$

Parametry regulátoru rychlosti určíme z frekvenční charakteristiky otevřené rychlostní smyčky (viz Příloha 10), jejíž přenos je:

$$F_W = F_{io} \cdot k\Phi \cdot F_M \quad (3.124)$$

Pro úhel bezpečnosti $\varphi_b = 70^\circ$ odečteme úhlovou frekvenci $\omega_{rw} = 107$ rad/s = $10^{2,03}$, což odpovídá zesílení $A = -72,9$ dB. Je potřeba posunout amplitudovou charakteristiku o 72,9 dB nahoru. Zesílení regulátoru rychlosti tedy bude:

$$72,9 = 20 \cdot \log K_{Ri} \quad (3.125)$$

$$K_{R\omega} = 10^{3,645} = 4\,415,7 \quad (3.126)$$

Časová konstanta regulátoru rychlosti:

$$\tau_{R\omega} = 10^{2,03} = 107 \text{ s} \quad (3.127)$$

Přenos regulátoru rychlosti – typ PI:

$$F_{R\omega} = K_{R\omega} \cdot \frac{1 + p\tau_{R\omega}}{p\tau_{R\omega}} = 4\,415,7 \frac{1 + p\,107}{p\,107} \quad (3.128)$$

Přenos otevřené rychlostní smyčky:

$$F_{\omega o} = F_{R\omega} \cdot F_{io} \cdot k\Phi \cdot F_M \quad (3.129)$$

Přenos uzavřené rychlostní smyčky:

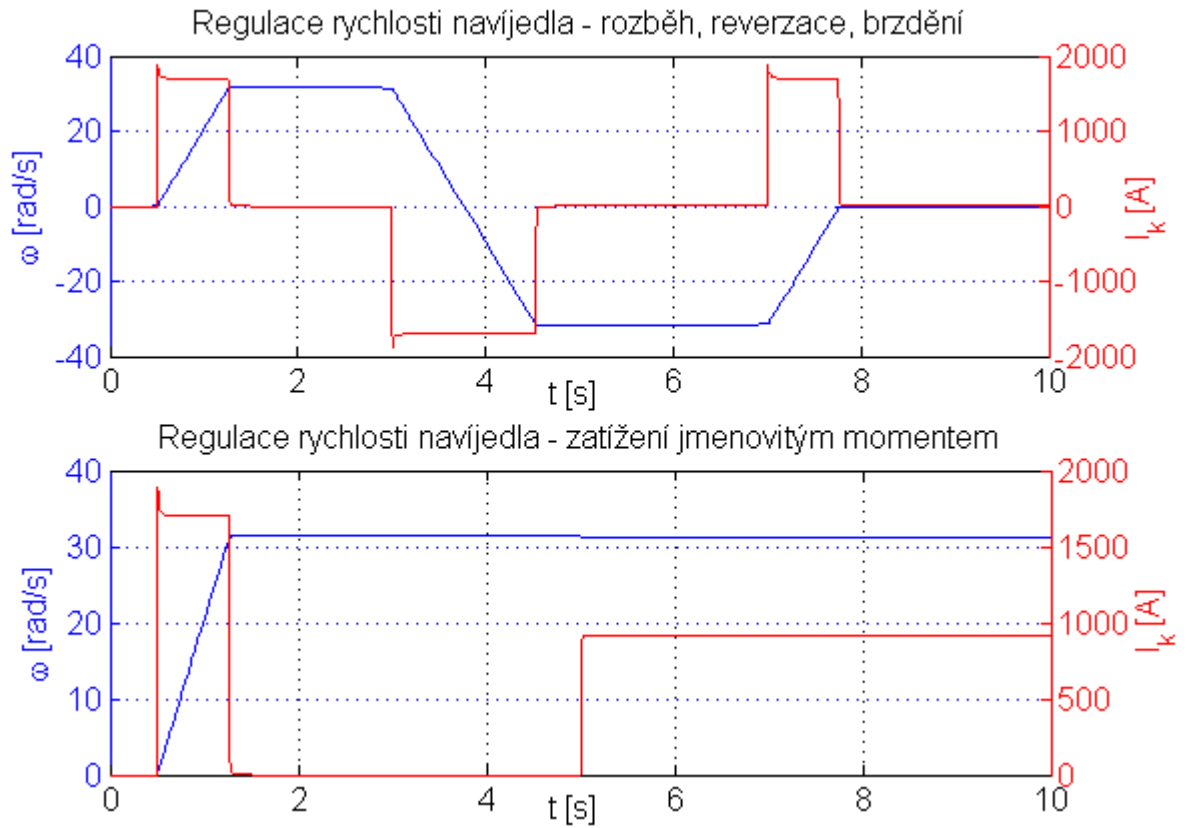
$$F_{\omega u} = \frac{F_{\omega o}}{F_{\omega o} + 1} \quad (3.130)$$

Výsledný přenos v otevřené a uzavřené smyčce je zobrazen v příloze (viz Příloha 11).

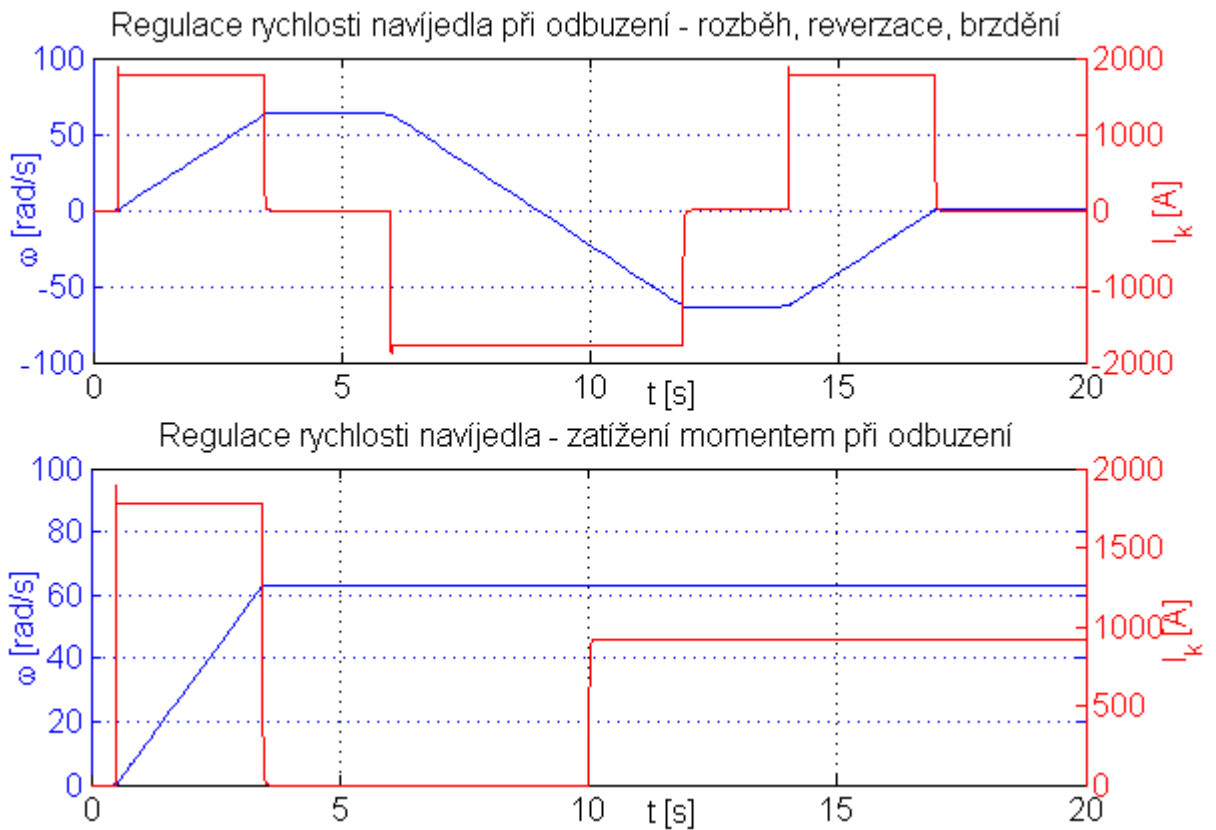
Na modelu byla odzkoušena odezva na skokové zadání $\omega_N^* = 31,4$ rad/s při jmenovitém nabuzení motoru, tj. $k\Phi_N = 15,28$. Byl vyzkoušen rozběh, reverzace a brzdění, viz Obr. 3-28.

Dále byla vyzkoušena odezva na skokové zatížení pohonu jmenovitým momentem $M_Z = 14$ kN.

Na Obr. 3-29 jsou znázorněny stejné průběhy pro trvale odbuzený motor, tj. $k\Phi = 7,24$. Zátěžný moment je v tomto případě $M_Z = 7$ kN a otáčky $\omega^* = 62,8$ rad/s.



Obr. 3-28 - Průběhy rychlosti a proudu navíječky při požadavku na jmenovité otáčky, reverzaci, brzdění a zatížení jmenovitým momentem při jmenovitém nabuzení



Obr. 3-29 - Průběhy rychlosti a proudu navíječky při požadavku na jmenovité otáčky, reverzaci, brzdění a zatížení momentem při odbuzení

3.6.4 Regulace obvodu buzení

Struktura regulačního obvodu je znázorněna na Obr. 3-22.

Regulace buzení je důležitá pro dodržení podmínky konstantního tahu navíjedla. Jako měnič pro buzení je použit 1Q můstek, který je součástí 4Q měniče kotvy. Proudem kotvy se udržuje požadovaný konstantní tah:

$$F_T = \frac{M_T}{R} = \frac{k\Phi \cdot I_k}{R} = konst. \quad (3.131)$$

S rostoucím poloměrem R je nutné úměrně zvětšovat i moment M. Při $I_k = konst.$ bude $F_T = konst.$, jestliže změna R bude respektována změnou budícího toku, tedy budícím proudem.

$$I_b \sim k\Phi \sim R \quad (3.132)$$

Budící vinutí

Časové konstanty budícího vinutí:

$$\tau_b = 3,5 \text{ s} \quad (3.133)$$

$$\tau_v = 0,05 \tau_b = 0,05 \cdot 3,5 = 0,175 \text{ s} \quad (3.134)$$

Zesílení budícího vinutí:

$$K_b = \frac{1}{R_b} = \frac{1}{1,8278} = 0,547 \text{ A/V} \quad (3.135)$$

Přenos budícího vinutí:

$$\begin{aligned} F_b(p) &= K_b \cdot \frac{1 + p \tau_v}{1 + p(\tau_b + \tau_v)} = \frac{K_b}{1 + p(\tau_b + \tau_v)} + \frac{K_b \cdot p \tau_v}{1 + p(\tau_b + \tau_v)} \\ &= \frac{0,547}{1 + p(3,5 + 0,175)} + \frac{0,547 \cdot p \cdot 0,175}{1 + p(3,5 + 0,175)} \end{aligned} \quad (3.136)$$

Tlumící obvod:

$$K_V = \frac{k\phi_N}{I_{bN}} = \frac{15,28}{30} = 0,509 \quad (3.137)$$

Tyristorový měnič

Tyristorový měnič se vyznačuje velmi krátkou časovou konstantou, která při frekvenci sítě 50 Hz činí:

$$\tau_U = \frac{1}{2 \cdot 50} = 0,01 \text{ s} \quad (3.138)$$

Zesílení tyristorového měniče buzení:

$$K_{Ub} = \frac{U_{bmax}}{10} = \frac{390}{10} = 39 \quad (3.139)$$

Přenos tyristorového měniče buzení:

$$F_{Ub} = \frac{K_{Ub}}{1 + p\tau_U} = \frac{39}{1 + p \cdot 0,01} \quad (3.140)$$

Regulátor budícího proudu motoru

Ze zkušenosti se volí následující hodnoty zesílení a časové konstanty:

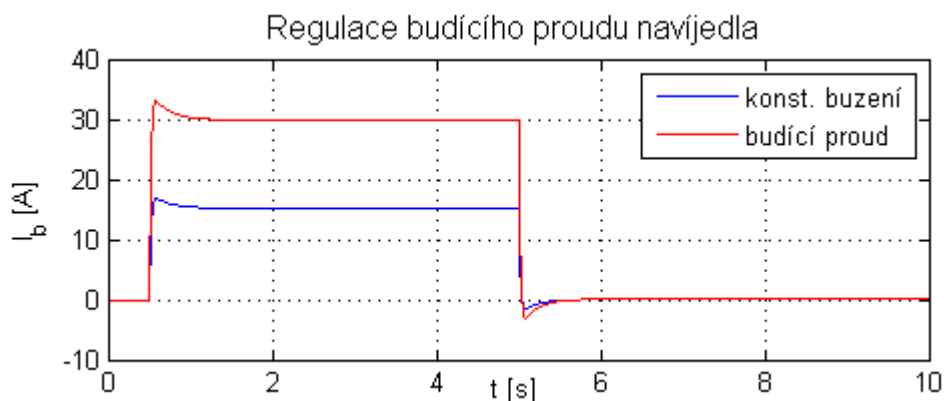
$$K_{Rb} = 10 \quad (3.141)$$

$$\tau_{Rb} = 100 \text{ ms} \quad (3.142)$$

Přenos regulátoru budícího proudu (typ PI):

$$F_{Rb}(p) = K_{Rb} \cdot \frac{1 + p\tau_{Rb}}{p\tau_{Rb}} = 10 \cdot \frac{1 + 0,1 p}{0,1 p} \quad (3.143)$$

Dynamické chování regulační smyčky buzení je analyzováno na základě jednotkového skoku žádané hodnoty budícího proudu.



Obr. 3-30 - Odezvy budícího proudu a konstanty nabuzení při požadavku na jmenovité nabuzení

3.6.5 Regulace indukovaného napětí

Regulátor indukovaného napětí:

$$F_{Re}(p) = K_{Re} \cdot \frac{1 + p\tau_{Re}}{p\tau_{Re}} \quad (3.144)$$

Zesílení regulátoru indukovaného napětí:

$$K_{Re} = \frac{\tau_v}{2 \cdot K_v \cdot 2 \tau_U} = \frac{0,175}{2 \cdot 0,509 \cdot 2 \cdot 0,00167} = 51,5 \quad (3.145)$$

Časová konstanta regulátoru indukovaného napětí:

$$\tau_{Re} = 4 \cdot 2 \tau_U = 4 \cdot 2 \cdot 0,00167 = 0,01336 \text{ s} \quad (3.146)$$

Přenos regulátoru indukovaného napětí:

$$F_{Re} = K_{Re} \cdot \frac{1 + p\tau_{Re}}{p\tau_{Re}} = 51,5 \frac{1 + p \cdot 0,01336}{p \cdot 0,01336} \quad (3.147)$$

3.6.6 Simulace pohonu s regulací tahu

Z aktuálního průměru svitku a požadovaného tahu se vypočítá potřebný tahový moment:

$$M_F = \frac{F_T \cdot D_S}{2 \cdot i \cdot \eta} \quad (3.148)$$

Ze zadaného momentu setrvačnosti, zrychlení a aktuálního průměru svitku se vypočítá akcelerační moment:

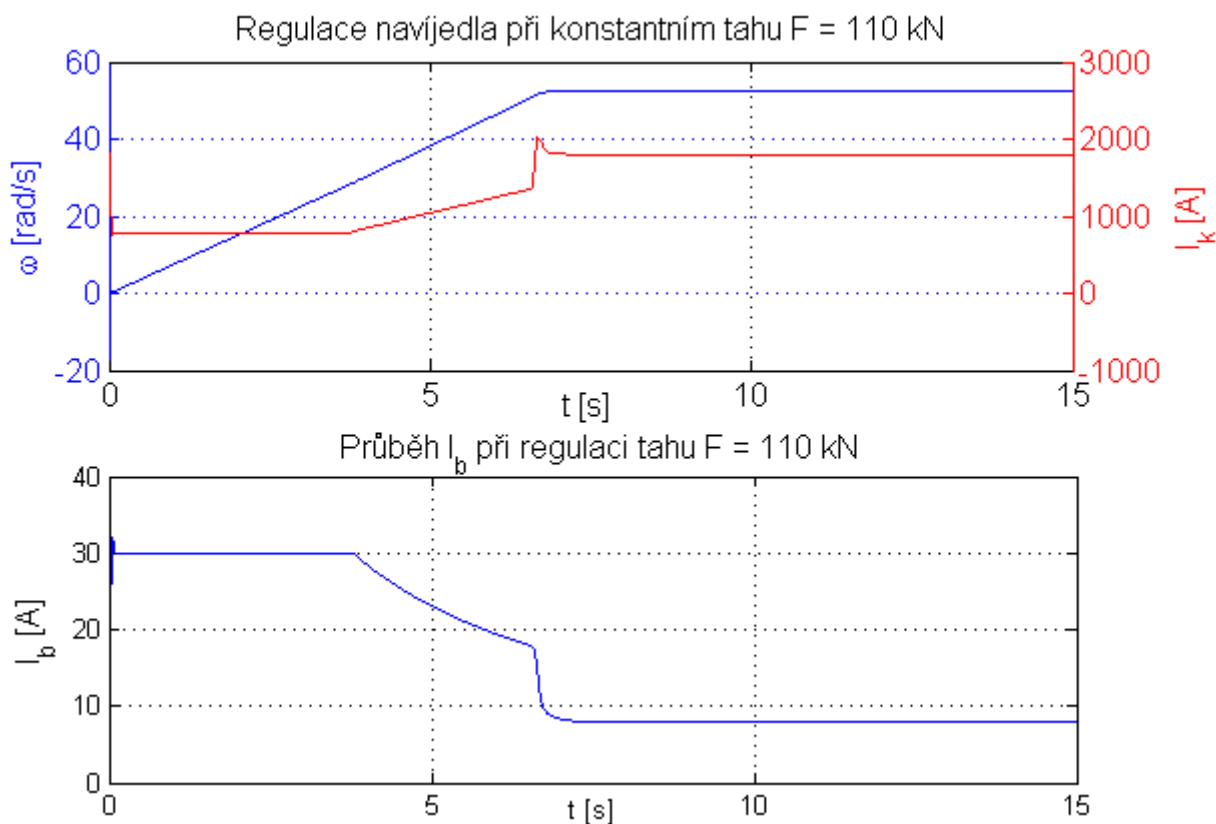
$$M_a = \frac{J \cdot 2 \cdot a \cdot i}{D_S} \quad (3.149)$$

Kotevní proud motoru je úměrný součtu tahového, akceleračního a ztrátového momentu, podělenému konstantou buzení:

$$I_k = \frac{M}{k\phi} \quad (3.150)$$

V dynamických dějích je nutné zavést korekci kotevního proudu:

$$I_{k_kor} = \frac{J}{\omega \cdot t \cdot k\phi} \quad (3.151)$$



Obr. 3-31 – Odezvy rychlosti, kotevního a budicího proudu při rozběhu pohonu navíjedla při prázdném bubnu, konstantním tahu $F = 110$ kN a zrychlení $a = 0,5$ m/s²

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo ukázat možnosti modernizace základních pohonů válcovací tratě Kvarto určené pro výrobu měděných a mosazných ploštín a pásů. Původní pohon s Ward-Leonardovým soustrojím byl nahrazen tyristorovými měniči.

V této práci jsou prezentovány dva možné způsoby provedení této modernizace. Prvním je náhrada pouze části W-L soustrojí při zachování napájení z dynam a motorů, tzv. malá tyristorizace. Tyristorové měniče jsou nasazeny do budících obvodů dynam. Tato modernizace je méně finančně náročná.

Druhý možný způsob modernizace byl navržen na konkrétním případě válcovny Kvarto a popsán detailně v této práci. Všechny části W-L soustrojí byly nahrazeny tyristorovými měniči a byly zachovány pouze hlavní stejnosměrné motory, byla provedena tzv. velká tyristorizace. V rámci modernizace bylo nutné nadimenzovat měniče pro napájení kotvy a buzení motoru, měničové transformátory, síťové a vyhlazovací tlumivky. Dále byl navržen způsob řízení a ovládání jednotlivých měničů. Ovládací tlačítka a signalizační prvky byly rozmístěny na konkrétní digitální a analogové vstupy a výstupy řídicích jednotek měničů.

V poslední části práce byl proveden návrh regulátorů válcovací tratě. U pohonu válcovací stolice se jednalo o regulaci rychlosti se závislým odbuzováním. Řízení měniče pohánějícího tahové navíjedlo je realizováno regulací tahu. Statické i dynamické vlastnosti regulačních smyček byly nasimulovány v prostředí Simulink. Všechny výsledky získané simulacemi odpovídají teoretickým předpokladům a přibližují se reálnému chování pohonu.

Všechny cíle stanovené v úvodu práce byly splněny.

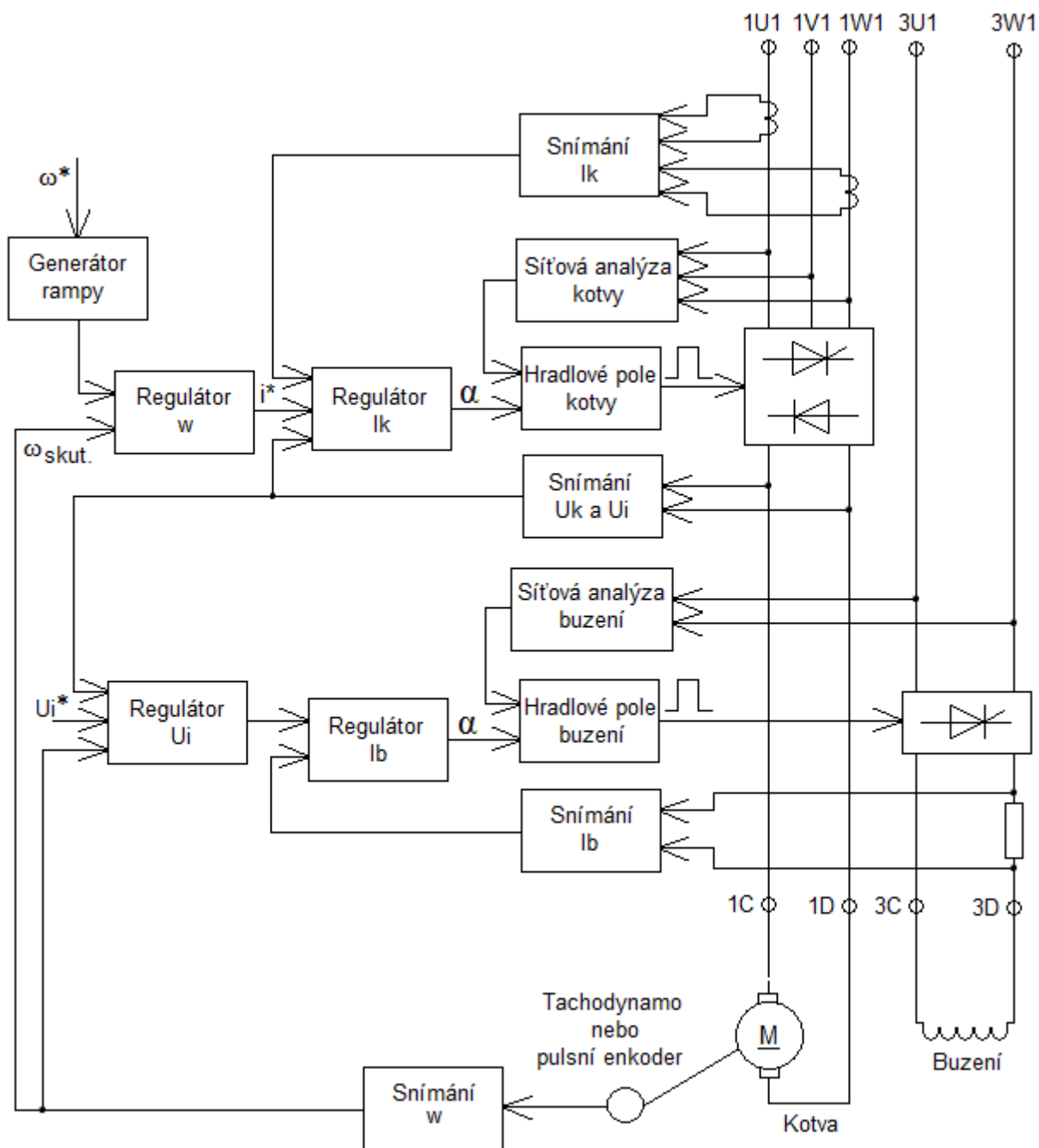
Seznam použité literatury

- [1] BLAŽEK, Jaroslav. Historie pohonů – tyristorová budící jednotka s W-L soustrojím. *Automatizace* [online]. 06/2012 [cit. 16. 11. 2012]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/historie-pohonu-tyristorova-budici-jednotka-s-w-l-soustrojim>
- [2] VACCARO, F., JANUAZ, M., KÜHN, K. Digital Control of a Ward Leonard Drive System. *IEEE Xplore* [online]. Dostupné z: www.ieee.org
- [3] CHMELÍK, Karel. Sto let od realizace prvního Ilgnerova soustrojí v hutích. *Elektro* [online]. 06/2006 [cit. 16. 11. 2012]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26847
- [4] WIECHMANN, Harald. Continuous innovation in large drives for rolling mills. *Millenium Steel* [online]. 2005 [cit. 7. 12. 2012]. Dostupné z: <http://www.millennium-steel.com/articles/pdf/2005/pp223-226%20MS05.pdf>
- [5] SIEMENS AG. Sinamics DCM. Closed-loop control application for a Ward-Leonard block. Edition 01 – 04/2001.
- [6] SOUKENÍK, Jan. Elektrické pohony válcovacích tratí. Praha: SNTL, 1959.
- [7] SIEMENS AG. SIDAC Reactors and Filters. Katalog LV 60, 2010.
- [8] VONDRÁŠEK, František. Výkonová elektronika. Svazek 2. Měniče s vnější komutací. Skripta ZČU, Plzeň, 2003.
- [9] SIEMENS AG. Sinamics DCM Converter Units. Katalog D 23.1, 2010.
- [10] CARNEGIE, H. S. The Electrical Driving of Rolling Mills. *IEEE Xplore* [online]. Dostupné z: www.ieee.org
- [11] BARTOŠ, Václav. Teorie elektrických strojů. Skripta ZČU, Plzeň, 2009.
- [12] SIEMENS AG. Sinamics DCM. Application Sinamics DCM as field supply unit. Editon 03 – 1/2012.
- [13] SIEMENS AG. Sinamics DCM. Control Module for DC variable-speed drives. Operating Instructions, 10/2011.
- [14] BEJČKOVÁ, Klára. Návrh řízení frekvenčního měniče asynchronního stroje. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.

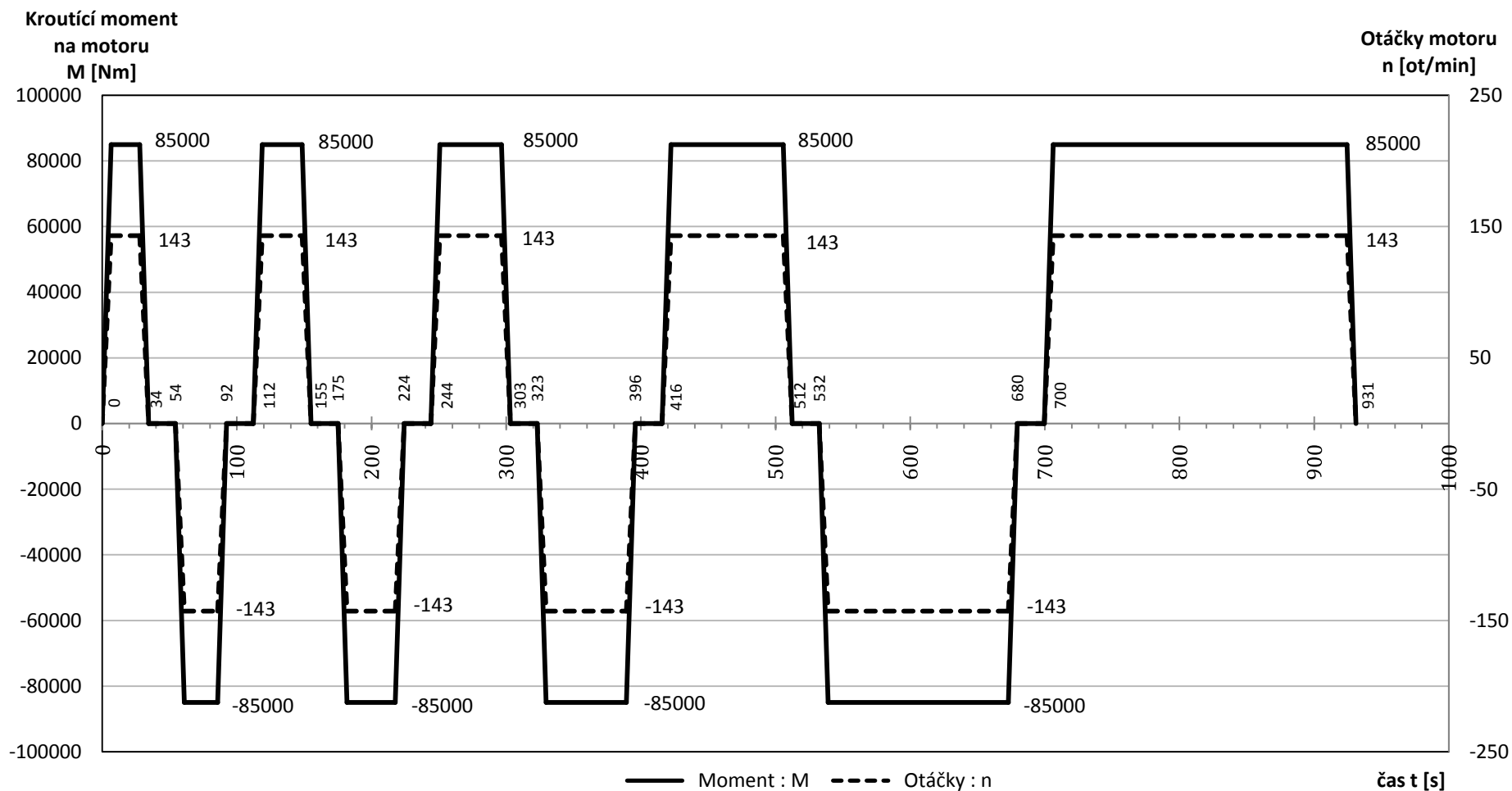
Přílohy

Seznam příloh

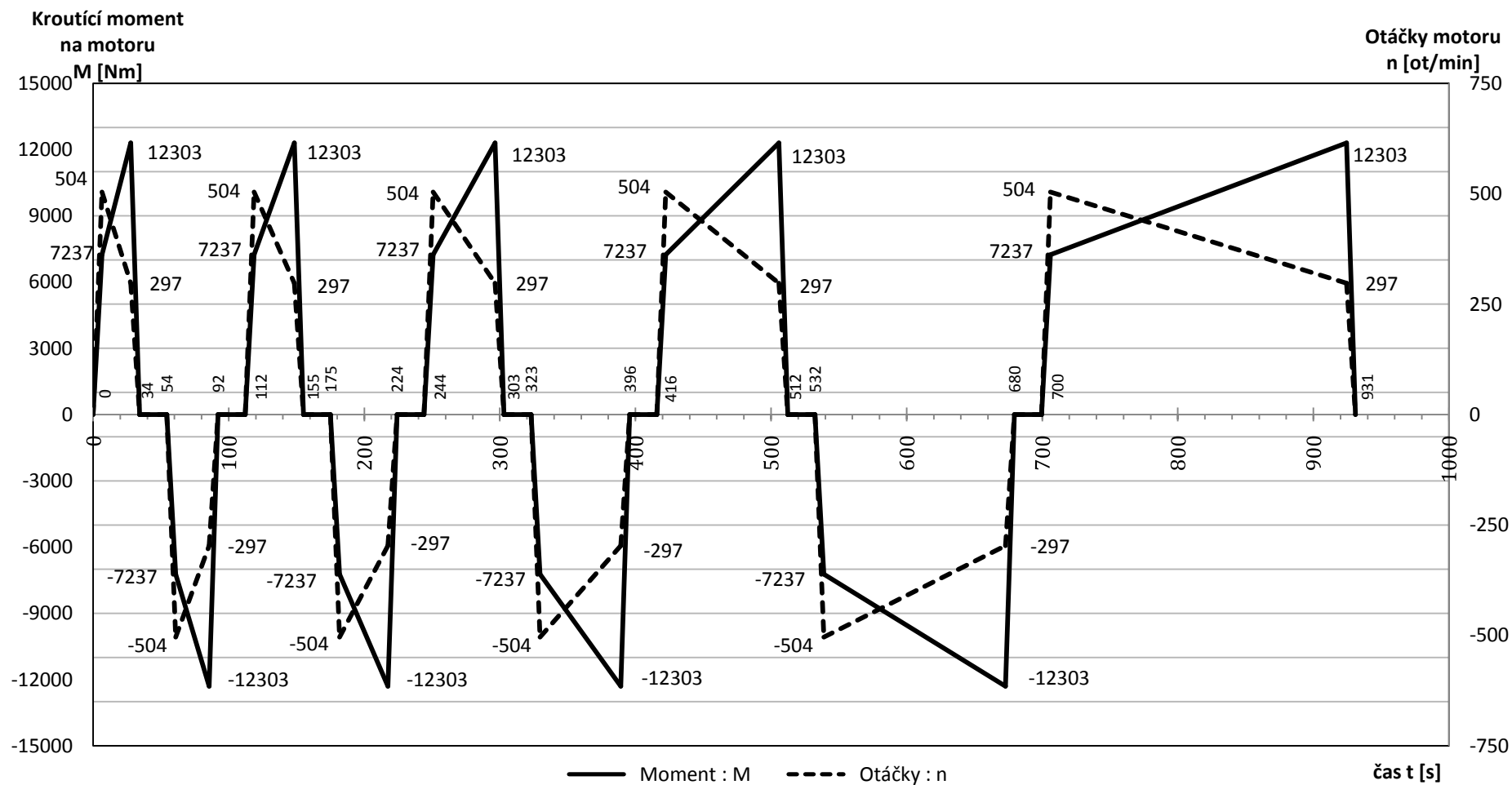
- Příloha 1 – Blokové schéma regulace motoru při velké tyristorizaci [9]
- Příloha 2 – Zatěžovací diagram válcovací stolice
- Příloha 3 – Zatěžovací diagram tahového navíjedla
- Příloha 4 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru proudu kotvy pohonu stolice
- Příloha 5 – Přenos jednotlivých bloků proudové smyčky pohonu stolice
- Příloha 6 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru rychlosti pohonu stolice
- Příloha 7 – Přenos otevřené a uzavřené proudové a rychlostní smyčky pohonu válcovací stolice
- Příloha 8 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru proudu kotvy pohonu navíjedla
- Příloha 9 – Přenos jednotlivých bloků proudové smyčky pohonu navíjedla
- Příloha 10 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru rychlosti pohonu navíjedla
- Příloha 11 – Přenos otevřené a uzavřené proudové a rychlostní smyčky pohonu navíjedla
- Příloha 12 – Regulační schéma pohonu válcovací stolice (Simulink)
- Příloha 13 – Regulační schéma pohonu navíjedla (Simulink)



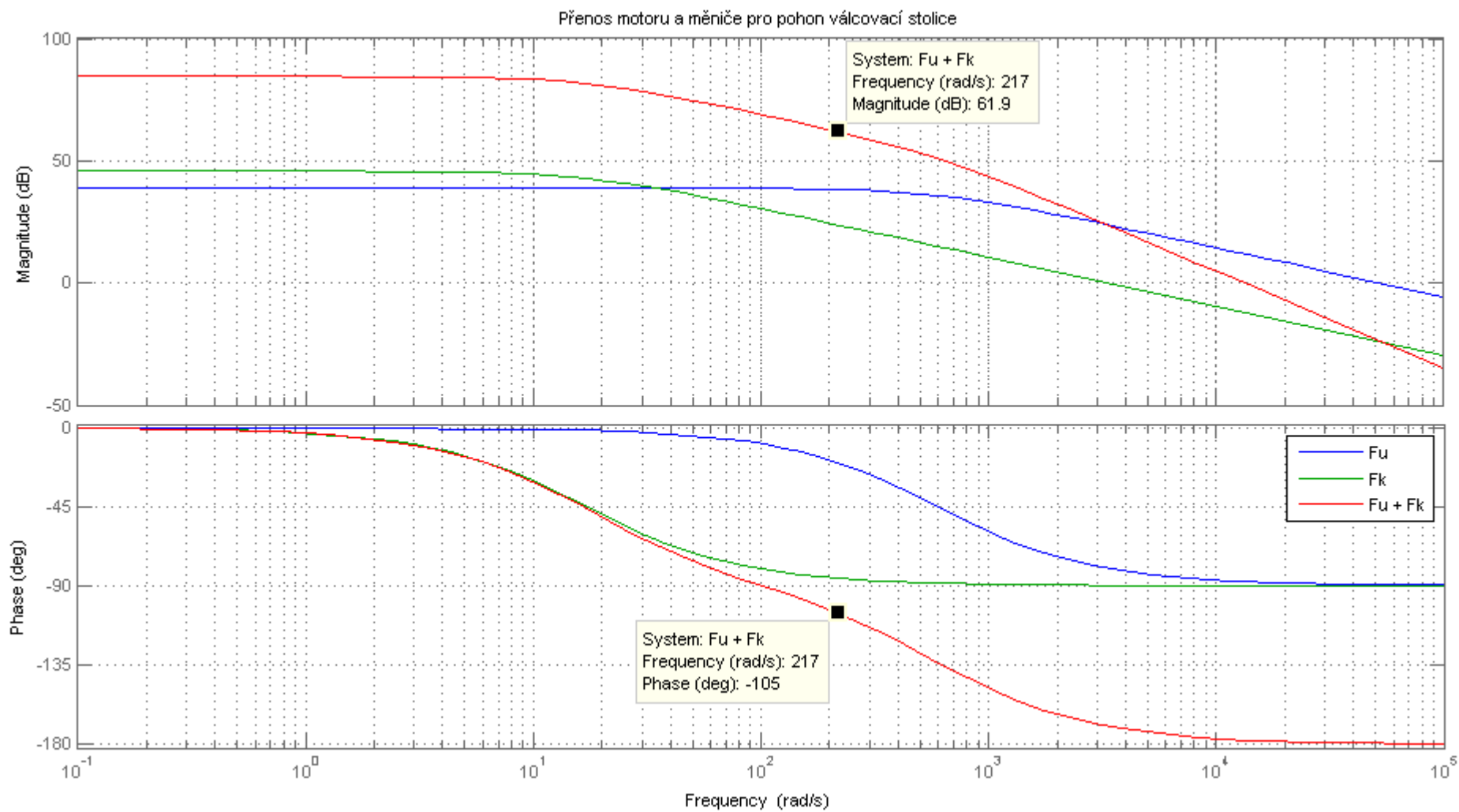
Příloha 1 – Blokové schéma regulace motoru při velké tyristorizaci [9]



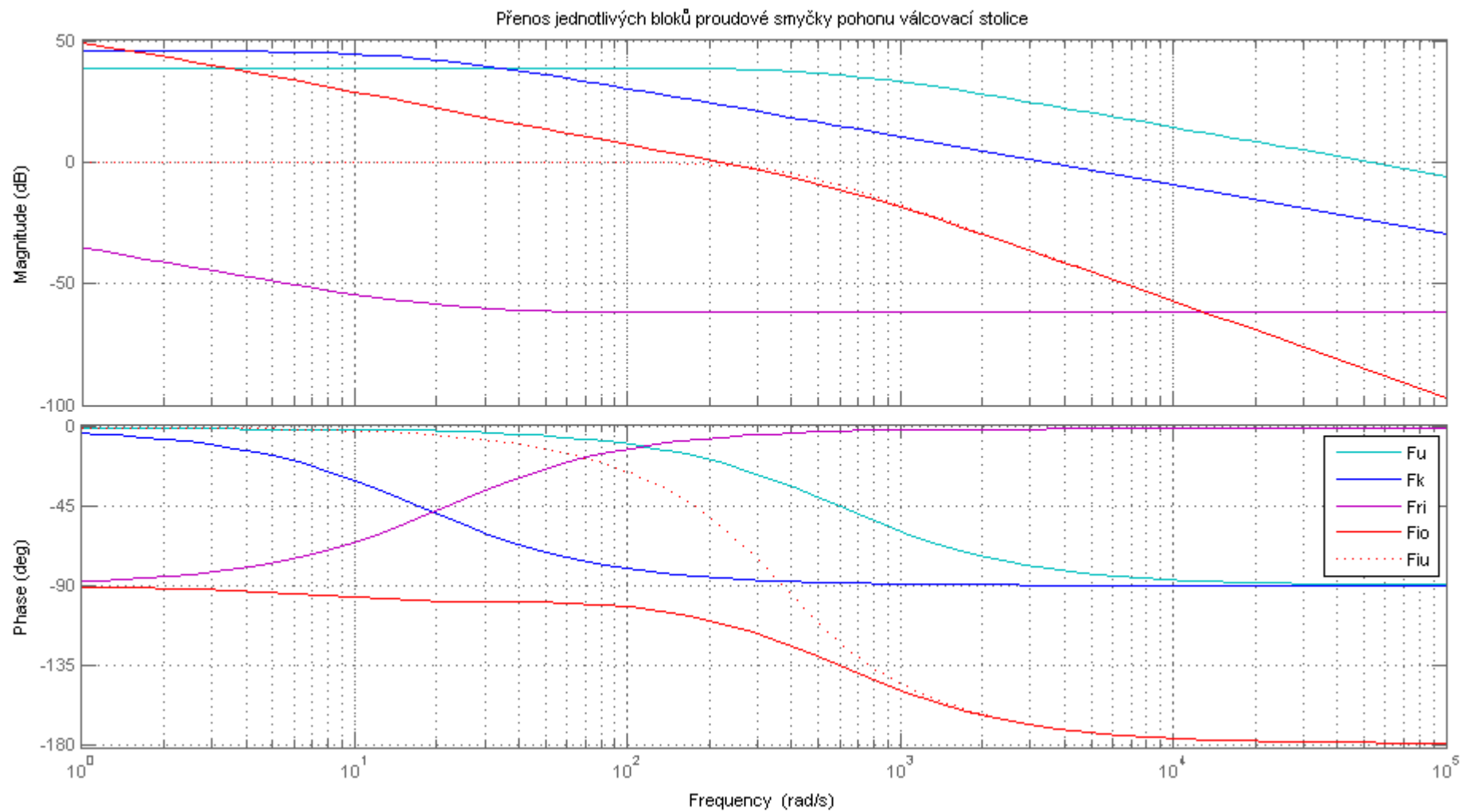
Příloha 2 – Zatěžovací diagram válcovací stolice



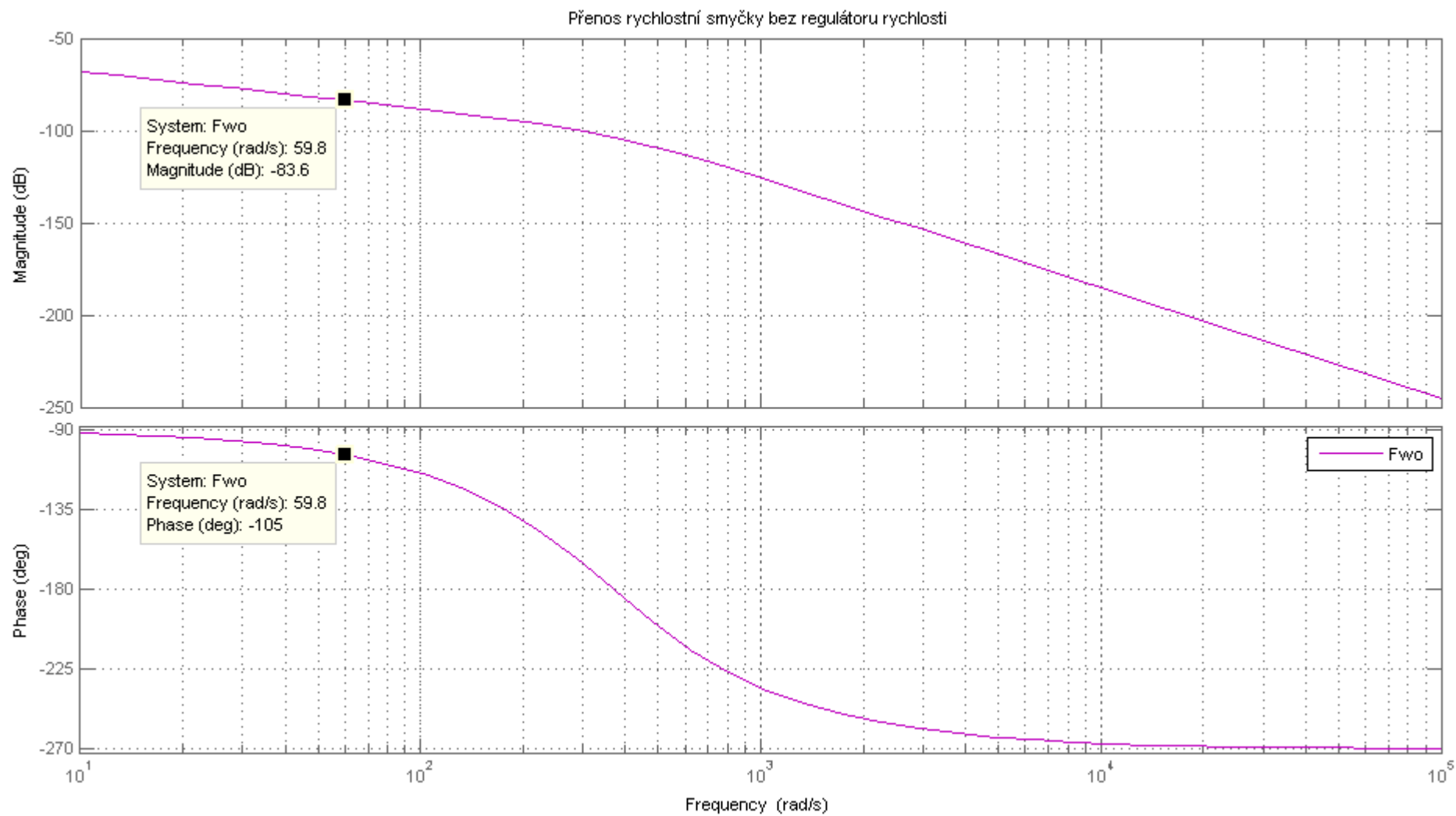
Příloha 3 – Zatěžovací diagram tahového navijedla



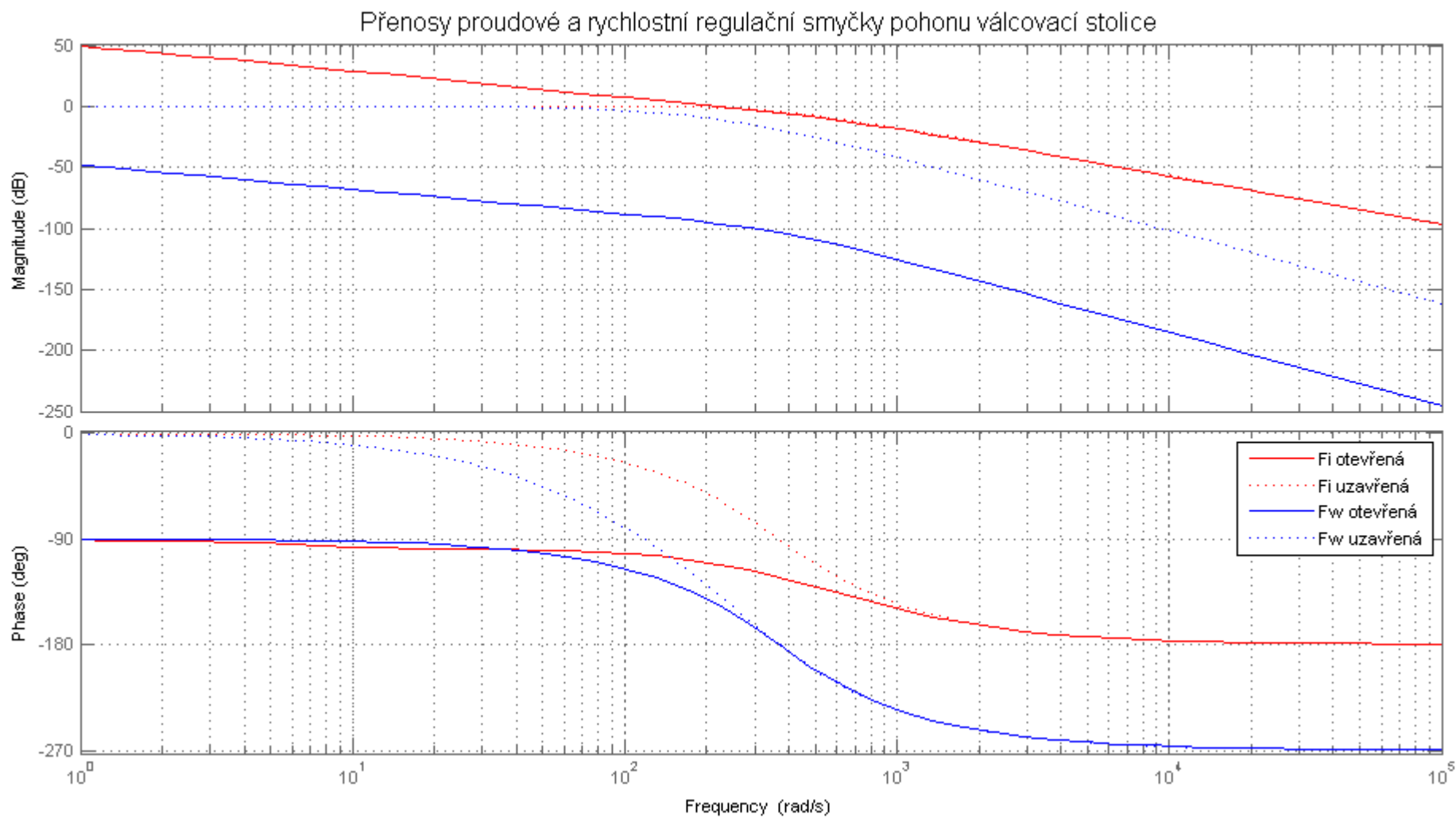
Příloha 4 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru proudu kotvy pohonu stolice



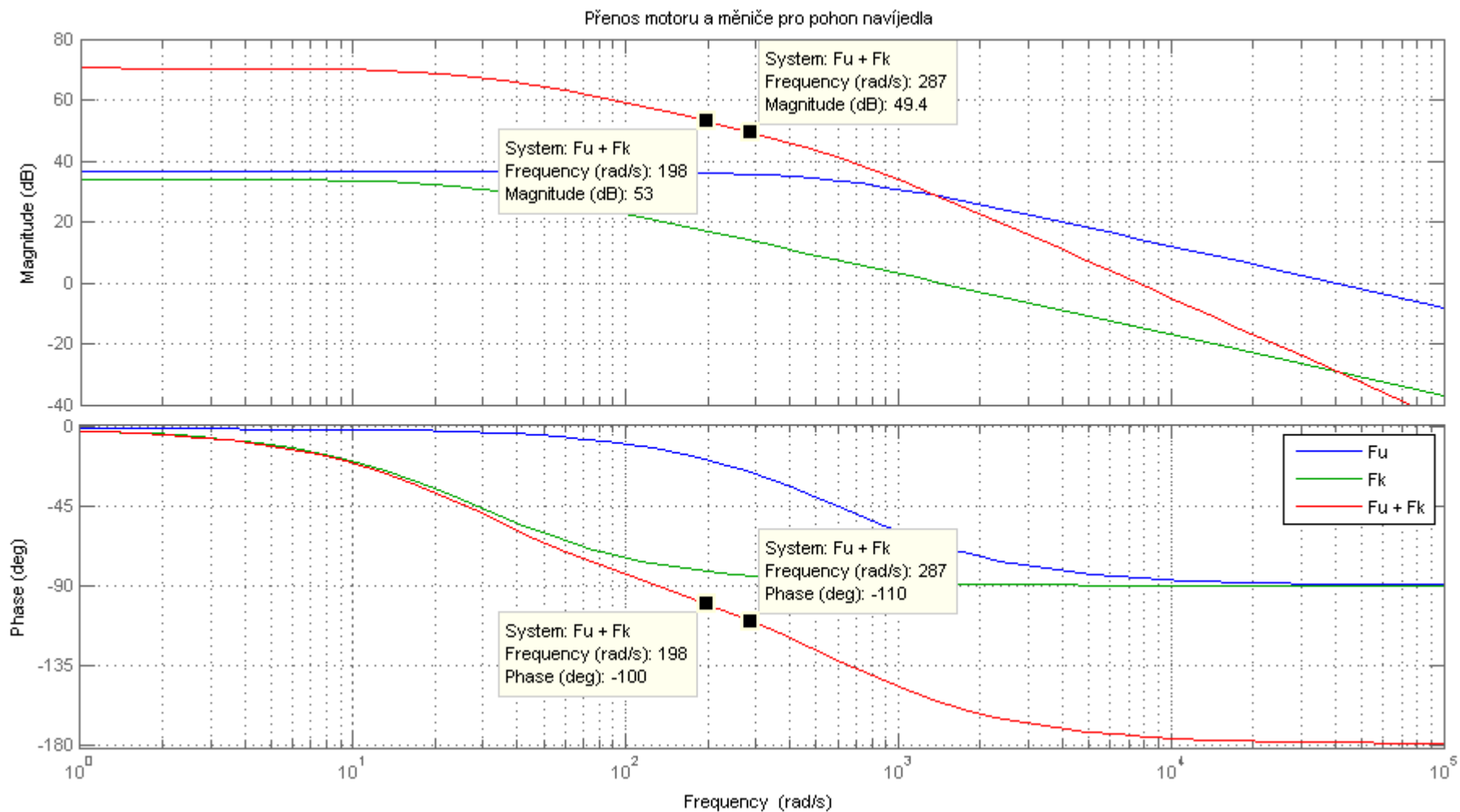
Příloha 5 – Přenos jednotlivých bloků proudové smyčky pohonu stolice



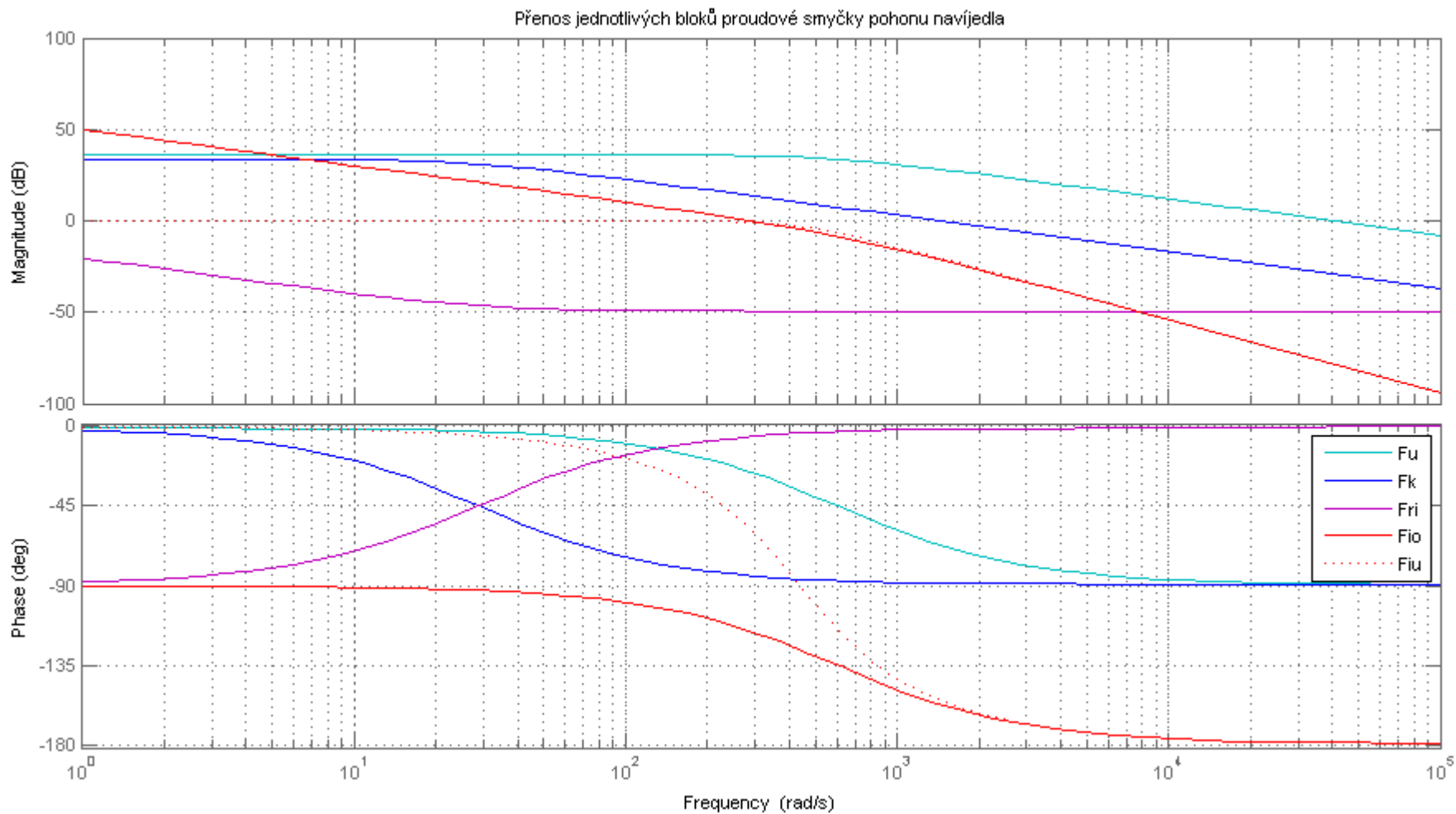
Příloha 6 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru rychlosti pohonu stolice



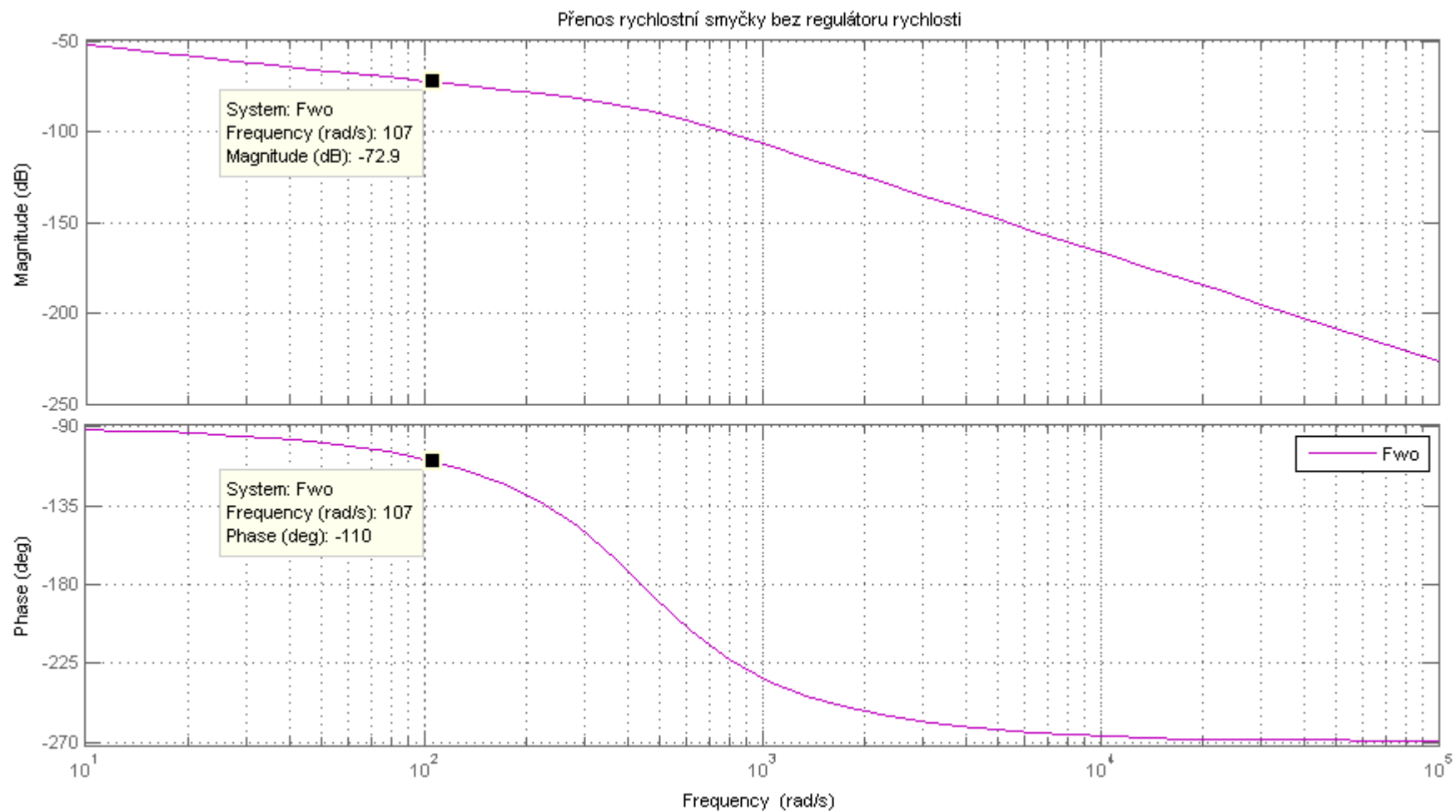
Příloha 7 – Přenos otevřené a uzavřené proudové a rychlostní smyčky pohonu válcovací stolice



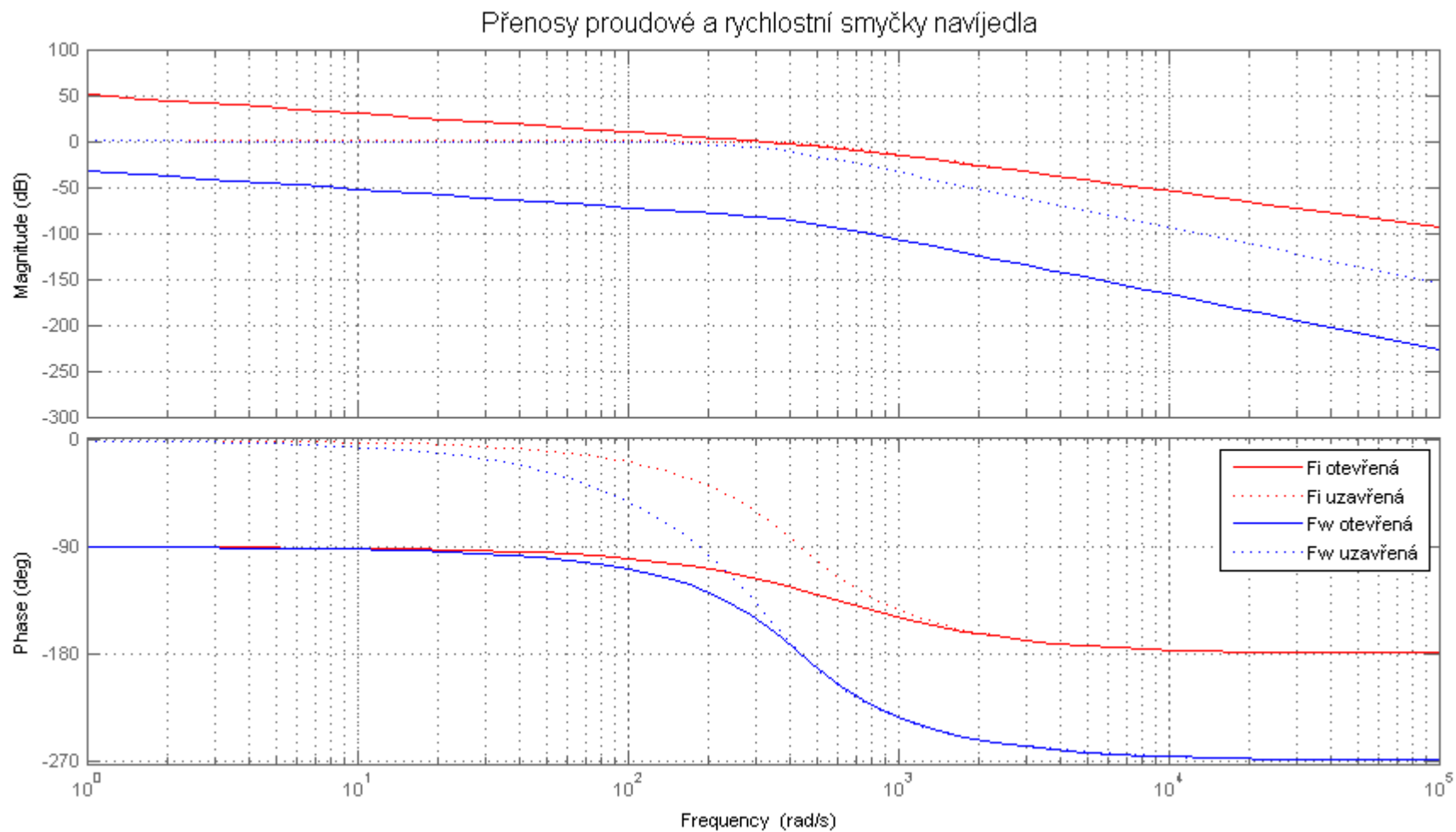
Příloha 8 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru proudu kotvy pohonu navíječky



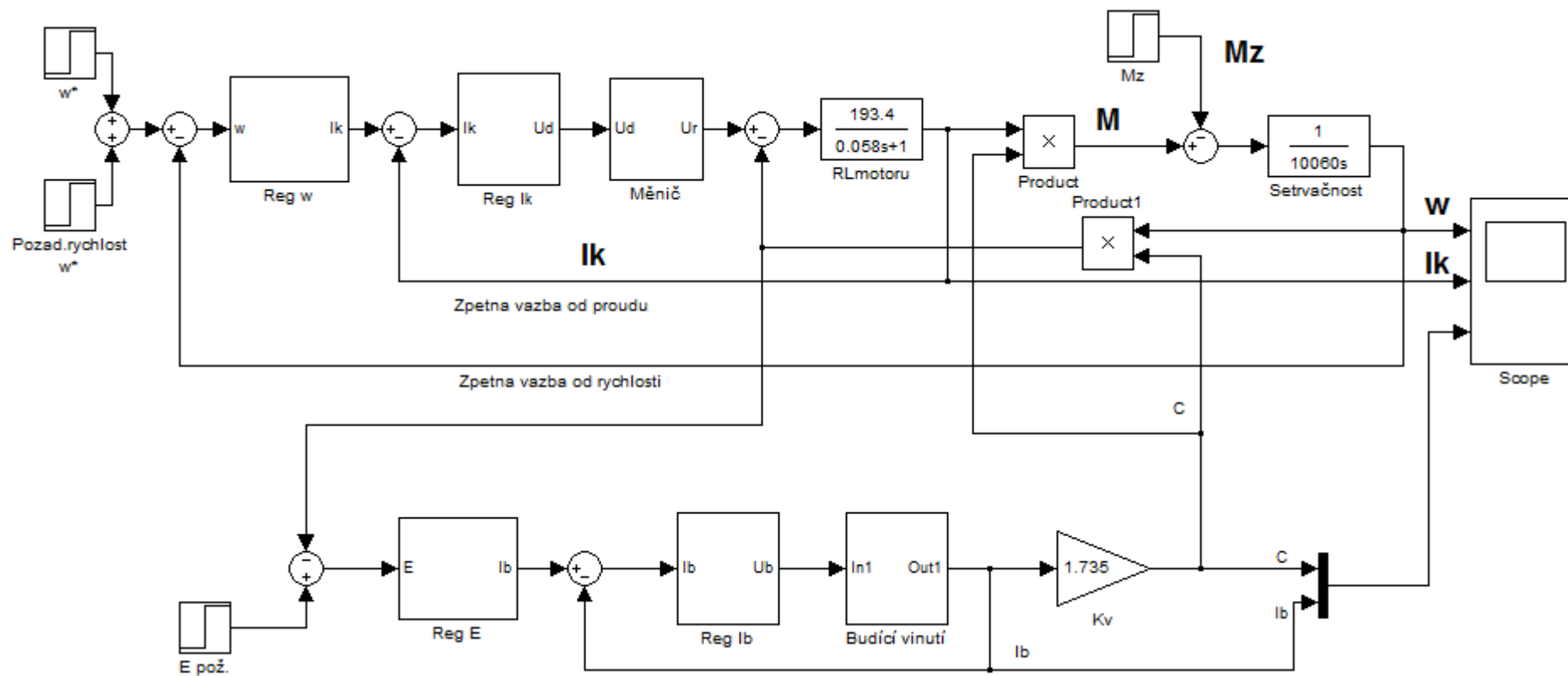
Příloha 9 – Přenos jednotlivých bloků proudové smyčky pohonu navíječky



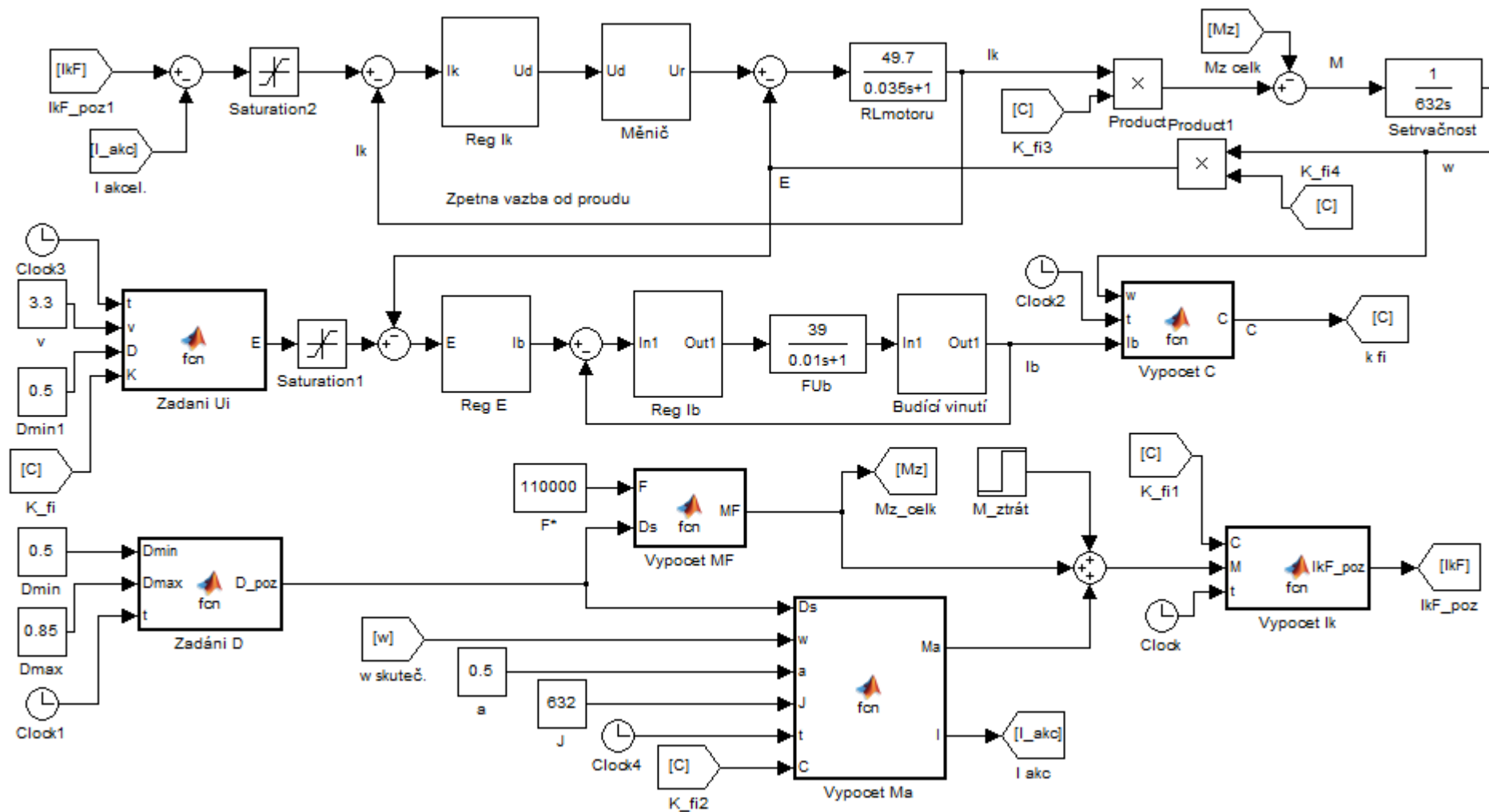
Příloha 10 – Určení zesílení a časové konstanty regulátoru rychlosti pohonu navíjeďla



Příloha 11 – Přenos otevřené a uzavřené proudové a rychlostní smyčky pohonu navijedla



Příloha 12 – Regulační schéma pohonu válcovací stolice (Simulink)



Príloha 13 – Regulační schéma pohonu navijedla (Simulink)